



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사학위논문

APEX-Paddy 모형 개발 및 논벼 기후변화 영향평가

APEX-Paddy Model Development and
Climate Change Impact Assessment for
Paddy Rice

2019년 2월

서울대학교 대학원
생태조경 · 지역시스템 공학부
지역시스템공학전공
최 순 군

APEX-Paddy 모형 개발 및
논벼 기후변화 영향평가
APEX-Paddy Model Development and
Climate Change Impact Assessment for
Paddy Rice

지도교수 최 진 용
이 논문을 공학박사학위논문으로 제출함

2018년 12월

서울대학교 대학원
생태조경·지역시스템공학부 지역시스템공학전공
최 순 군

최 순 군의 공학박사 학위논문을 인준함.

2019년 1월

위 원 장

康 文 義 (인)

부위원장

崔 鎭 鎔 (인)

위 원

宋 寅 鴻 (인)

위 원

張 太 溢 (인)

위 원

劉 乘 煥 (인)

국 문 초 록

APEX-Paddy 모형 개발 및 논벼 기후변화 영향평가

기후변화는 농업 생산성과 농경지 수문순환 및 환경에 영향을 줄 것으로 예상된다. 논은 국내 농경지의 약 58%를 차지하고 있으며 물 환경과 밀접한 관련이 있다. 국가 수자원의 47.7%가 농업용수로 사용되는데 논은 이 중 80% 이상을 사용하며 경작 방법 및 물 관리방법에 따라 비점오염 배출 양상이 다르다. 따라서 장기적인 농업수자원 계획 수립과 농업 생산 환경의 변화를 평가하기 위하여 논 재배환경을 고려한 모형 개발과 기후변화 영향평가 연구가 필요하다.

본 연구에서는 농경지 비점오염 저감 기술의 효과를 분석할 수 있는 APEX 모형을 대상으로 우리나라의 논벼 재배환경을 반영하여 APEX-Paddy 모형을 개발하였다. 개발된 모형의 보·검정을 위해 인천 시험포장의 유입·유출량 및 질소 유출 부하량 측정 자료와 김제 시험포장의 유입·유출량 및 증발산량 측정 자료를 사용하였다. 논 수면증발을 고려한 증발산량을 산정하여 증발산량의 모의 수준을 높였으며 논 물 관리 등 논벼 재배특성을 고려하여 유출량과 질소 유출 부하량의 모의 수준을 개선하였다.

기후변화 영향평가를 위하여 APEX-Paddy 모형에 상세화된 기후변화시나리오를 적용하였다. APEC기후센터의 AIMS 모형을 이용하여 비모수적 분위사상법으로 9개 GCM을 편의보정하고 다중모형 앙상블에 의한 논벼 생산량, 필요수량, 질소 유출 부하량의 변화를 평가하였다. 그 결과, 기준년도 (1976~2005)에 비하여 2085년대 (2071~2100)에 논 필요수량은 -1.3~2.7%의 변화를 보여 변화가 유의하지 않은

것으로 나타났으며 논벼 생산량은 19.4~31.2%가 감소하는 것으로, 논
의 질소 유출 부하량은 16.9~76.0%가 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구는 논 재배환경을 고려하여 프로세스 기반의 모형을 개발
하고 다중모형 앙상블을 이용하여 기후변화 영향을 다각도로 분석
하였다는데 의의가 있다. 본 연구의 결과는 기후변화를 고려한 중·
장기적인 논벼 생산, 농업 수자원 및 물 환경 정책 수립을 위한 기
초자료로 활용될 것으로 사료된다.

주요어 : 논, 벼, APEX-Paddy 모형, 기후변화, 다중모형 앙상블

학 번 : 2015 - 30470

목 차

국 문 초 록	i
목 차	iii
List of Tables	v
List of Figures	vi
제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경 및 필요성	1
1.2 연구목적	7
제 2 장 연 구 사	8
2.1 논벼 생산 및 물 환경 영향평가 모형	8
2.1.1 논벼 생산 및 물 환경 영향 관측	8
2.2.2 논벼 생산 및 물 환경 영향평가 모형 개발 및 활용 ...	11
2.2 논벼 재배 환경의 기후변화 영향평가	13
2.1.1 기후변화와 작물반응	13
2.1.2 기후변화와 필요수량	16
2.1.3 기후변화와 물 환경 영향	18
제 3 장 논 환경 모형 개발 및 적용성 평가	20
3.1 APEX-Paddy 모형 개발	20
3.1.1 APEX 모형	20
3.1.2 APEX-Paddy 모형	22
3.2 APEX-Paddy 모형 적용성 평가	34
3.2.1 대상지역	34
3.2.2 모형의 보·검정 결과	38

제 4 장 기후변화 영향평가를 위한 APEX-Paddy 모형의 적용 ..	52
4.1 대상지역	52
4.2 기후변화 시나리오 및 재현성 평가	59
4.2.1 기후변화 시나리오의 상세화	59
4.2.2 기후변화 시나리오의 재현성 평가	64
4.2.3 기후인자 상관성 분석	73
4.3 기후변화 영향평가	75
4.3.1 기후변화에 따른 논벼 필요수량 변동 평가	75
4.3.2 기후변화에 따른 논벼 생산량 변동 평가	97
4.3.3 기후변화에 따른 논 질소 유출 부하량 변동 평가 ..	101
 제 5 장 요약 및 결론	 116
 참 고 문 헌	 121
 부 록	 141
 Abstract	 169

List of Tables

Table 3.1	Development history of APEX-Paddy model.....	24
Table 3.2	Important crop parameters for simulating paddy rice compared with upland rice (Choi <i>et al.</i> , 2017a).....	31
Table 3.3	Parameter calibration result for evapotranspiration.....	38
Table 3.4	General performance rating for recommended statistics (Moriassi <i>et al.</i> , 2015).....	45
Table 3.5	Summary of calibration and validation results for daily runoff at the study site.....	50
Table 3.6	Mineral nitrogen loads in paddy discharge (QN) estimated by Paddy module compared with the SCS-CN method at the Icheon site.....	51
Table 4.1	Paddy management schedule of study areas.....	56
Table 4.2	CO ₂ concentration value applied to APEX-Paddy model by analysis periods.....	60
Table 4.3	Characteristics of the GCMs in CMIP5 data analyzed in this study.....	62
Table 4.4	The result of correlation analysis between climatic factors virus rice yield, irrigation demand and mineral nitrogen yield in paddy field using multiple linear regression.....	74
Table 4.5	The result of correlation analysis between climatic factors virus runoff evapotranspiration, evaporation and transpiration in paddy filed using multiple linear regression.....	74
Table 4.6	Evaluation result for climate change impact on paddy evaporation.....	81

Table 4.7 Evaluation result for climate change impact on paddy rice transpiration.....	81
Table 4.8. Evaluation result for climate change impact on paddy evapotranspiration.....	82
Table 4.9 Evaluation result for climate change impact on paddy irrigation demand.....	82
Table 4.10 Evaluation result for climate change impact on rice yield (dry weight).....	98
Table 4.11 Evaluation result for climate change impact on paddy runoff.....	104
Table 4.12 Evaluation result for climate change impact on mineral nitrogen yield from paddy.....	104
Table A.1 Typical paddy management schedule (ex. Icheon).....	167

List of Figures

Fig. 3.1 Algorithm of the APEX-Paddy model.....	25
Fig. 3.2 Paddy water budget in APEX-Paddy model	26
Fig. 3.3 Modeling of the paddy drainage characteristic.....	27
Fig. 3.4 Calibration of the leaf area development curve.....	33
Fig. 3.5 Calibration of the root fraction curve.....	33
Fig. 3.6 Topographical maps of the study areas.....	34
Fig. 3.7 Water budget monitoring systems in Icheon paddy site.....	35
Fig. 3.8 Water budget monitoring systems in Gimje paddy site.....	37
Fig. 3.9 Result of the comparison between the simulated value before calibration (use default parameter) and the observed value	39
Fig. 3.10 Result of the comparison between the simulated value after calibration and the observed value.....	40
Fig. 3.11 Result of the comparison between the calibrated and the observed value for paddy evapotranspiration using Penman-Monteith equation.....	41
Fig. 3.12 Result of the comparison between the calibrated and the observed value for paddy evapotranspiration using Hargreaves equation....	42
Fig. 3.13 Predicted daily paddy field discharges are calibrated for the growing season in 2002, and then validated for the year 2003 at the Icheon site.....	47
Fig. 3.14 Simulated discharge amounts indicate that the timing and magnitude of peak discharges in response to outlet weir management are well predicted during the growing season in 2014 at the Gimje site.....	47
Fig. 3.15 Daily QN predicted by APEX-Paddy is calibrated for the growing season in 2002 and then validated in 2003 at the Icheon site.....	48
Fig. 3.16 Comparison between APEX and APEX-Paddy model results for runoff.....	49

Fig. 3.17 Comparison between APEX and APEX-Paddy model results for mineral nitrogen yield.....	51
Fig. 4.1 Status of meteorological station.....	53
Fig. 4.2 Study areas Chuncheon, Suwon, Naju, and Jinju were selected considering quantity and quality of climate data, rice growth data, and agro-climatic zone.....	54
Fig. 4.3 Growth period of paddy rice. The full ripe period is when the cumulative temperature reaches 1100 degree from the heading date.....	55
Fig. 4.5 Schematic of the quantile mapping versus quantile delta mapping methodologies (Switanek <i>et al.</i> , 2017).....	63
Fig. 4.6 Comparisons among the observed value of annual average temperature and reproduced values for each GCMs.....	66
Fig. 4.7 Comparisons among the observed value of annual total precipitation and reproduced values for each GCMs.....	66
Fig. 4.8 Comparisons among the observed value of annual average solar radiation and reproduced values for each GCMs.....	67
Fig. 4.9 Comparisons among the observed value of annual average relative humidity and reproduced values for each GCMs.....	67
Fig. 4.10 Comparisons among the observed value of annual average wind speed and reproduced values for each GCMs.....	68
Fig. 4.11 Changes in solar radiation according to climate change for individual GCMs (Suwon).....	69
Fig. 4.12 Changes in mean temperature according to climate change for individual GCMs.....	71
Fig. 4.13 Changes in precipitation according to climate change for individual GCMs.....	72
Fig. 4.14 The evaluation result of the climate change impact on paddy evaporation.....	83

Fig. 4.15 The evaluation result of the climate change impact on paddy transpiration.....	84
Fig. 4.16 The evaluation result of the climate change impact on paddy evapotranspiration.....	85
Fig. 4.17 The evaluation result of the climate change impact on rice paddy irrigation demand.....	86
Fig. 4.18 Monthly evapotranspiration changes (historical period).....	87
Fig. 4.19 Monthly evapotranspiration changes (2025s period).....	88
Fig. 4.20 Monthly evapotranspiration changes (2055s period).....	89
Fig. 4.21 Monthly evapotranspiration changes (2085s period).....	90
Fig. 4.22 LAI development of rice under RCP4.5 scenario.....	91
Fig. 4.23 LAI development of rice under RCP8.5 scenario.....	92
Fig. 4.24 Monthly changes of rice paddy irrigation demand (historical period).....	93
Fig. 4.25 Monthly changes of rice paddy irrigation demand (2025s period).....	94
Fig. 4.26 Monthly changes of rice paddy irrigation demand (2055s period).....	95
Fig. 4.27 Monthly changes of rice paddy irrigation demand (2085s period).....	96
Fig. 4.28 The evaluation result of the climate change impact on rice yield (dry weight).....	99
Fig. 4.29 Biomass development of rice under RCP4.5 scenarios.....	100
Fig. 4.30 Biomass development of rice under RCP8.5 scenarios.....	100
Fig. 4.31 The evaluation result of the climate change impact on paddy runoff.....	105
Fig. 4.32 The evaluation result of the climate change impact on mineral nitrogen yield.....	106
Fig. 4.33 Monthly changes of paddy runoff (historical period).....	107
Fig. 4.34 Monthly changes of paddy runoff (2025s period).....	108
Fig. 4.35 Monthly changes of paddy runoff (2055s period).....	109
Fig. 4.36 Monthly changes of paddy runoff (2085s period).....	110
Fig. 4.37 Monthly changes of paddy mineral nitrogen yield (historical period).....	112

Fig. 4.38 Monthly changes of paddy mineral nitrogen yield (2025s period).....	113
Fig. 4.39 Monthly changes of paddy mineral nitrogen yield (2055s period).....	114
Fig. 4.40 Monthly changes of paddy mineral nitrogen yield (2085s period).....	115
Fig. A.1 Component of the APEX model.....	141
Fig. A.2 APEX model Input/Output system(ref. manual).....	147
Fig. A.3 Response of radiation use efficiency to CO ₂ concentration.....	149
Fig. A.4 Correlation between HUI and HIT, SWH and F.....	153
Fig. A.5 Distribution of crop (rice) temperature stress factors according to daily average temperature.....	155
Fig. A.6 Climate database of South Korea.....	165
Fig. A.7 Soil database of South Korea.....	166

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 필요성

산업혁명 이후 화석연료 사용에 따른 대기중 이산화탄소의 증가는 기후시스템의 복사강제력을 높이는 주요 원인인 것으로 나타났으며 이로 인한 기후변화는 인간계와 자연계에 광범위하게 영향을 주고 있다 (IPCC, 2014). 대기 중 CO₂ 농도의 증가에 의한 기후변화 - 기온상승, 강수량 및 강수특성의 변화는 농업생산성과 수문순환 변화에 영향을 줄 것으로 예상된다 (Kim *et al.*, 2004; Chung, 2010; Lee *et al.*, 2012; Jang *et al.*, 2015).

우리나라의 주곡인 벼는 기온과 강수량, 일사량 등의 기상조건에 민감하게 반응하며 각 생육단계별로 정상적으로 생육할 수 있는 온도조건이 있기 때문에 기후변화는 작황부진을 조장하여 국가 식량수급의 불안정을 가져올 가능성이 있다. 특히 출수 후 생육온도가 크게 상승하면 등숙기간 단축되어 종실중이 작아지고 (Sato and Inaba, 1976), 고온장해에 따른 불임증가 (Satake and Yoshida, 1978, Jagadashi *et al.*, 2007)로 생산량이 크게 감소할 우려가 있다.

안정적이고 지속적인 농작물 생산을 위해서는 기후변화가 농업수자원에 미치는 영향을 정확히 파악하고, 기후변화로 인해 발생할 수 있는 부정적 효과를 최소화하기 위한 연구가 필요하다 (Yoo *et al.*, 2012). 국가 수자원의 47.7%가 농업용수로 사용되는데 논은 이 중 80% 이상을 사용한다 (국토해양부, 2011; Song *et al.*, 2012). 따라서 논벼의 안전 생산은 농업용수의 안정성 및 지속가능성과 연관이 크다.

논벼의 필요수량 추정은 안전한 농업용수 공급을 위한 농업 수리

구조물 설계 및 운영의 기초이다. 필요수량 추정에는 유효수량 및 논벼 증발산량이 고려되는데 증발산량이 증가하면 필요수량이 증가하며 유효수량 증가는 필요수량 감소의 원인이 된다. 그러므로 기온 상승에 따른 증발산량 변화, 강수량 변화 및 강우빈도 변화에 따른 유효수량 변화 등 기후변화는 논벼 재배와 관련하여 안정적인 농업용수 공급 및 관리에 어려움을 야기할 것으로 예상된다 (Yoo *et al.*, 2012).

이와 관련하여 Hong *et al.* (2009)은 우리나라 논벼의 10년 빈도 증발산량 변화를 예측한 결과 증발산량이 현재보다 증가할 것으로 예측하였으며 Yun *et al.* (2011)과 Yoo *et al.* (2012)은 논벼 증발산량과 유효수량을 고려하여 논 용수 수요량을 평가한 결과 기후변화에 따라 논 용수 수요량이 증가하는 것으로 평가하였다. Nam *et al.* (2013)은 논벼 증발산량과 Tank 모형, 논 물수지 모형을 이용한 저수지가뭍지수 (RDI, Reservoir Drought Index)를 산정하고 논외가뭍 위험도를 평가하였으며, Nam *et al.* (2014)은 기후변화에 따른 농업용 저수지 용수공급 불확실성을 확률통계학적 방법을 활용하여 평가한 결과 미래 후기로 갈수록 공급량과 수요량이 동시에 증가하나 논 용수공급의 불확실성이 증가하는 경향을 보인다고 밝혔다.

그러나 논 용수 관련 연구에 적용된 증발산량 산정방법은 기후변화에 따른 벼의 생육특성 변화를 반영하지 못한다는 한계가 있었다. 또한, 대기 중 이산화탄소 농도가 증가하면 공변세포의 ABA (Absciscic Acid)가 증가하며 ABA의 증가는 기공 닫힘을 유도하므로 증산량이 감소한다고 보고되고 있으나 (Kimball and Idso, 1983; Xu *et al.*, 2016) FAO의 기준작물 증발산량 산정식은 이러한 특성이 반영되지 않는 한계가 있다. 따라서, Lee *et al.* (2012)은 CERES

(Crop-Environment REsource Synthesis)-Rice 모형을 이용하여 작물 생육반응을 고려한 논벼의 소비수량을 산정하였으며 Choi *et al.* (2017b)은 APEX (Agricultural Policy/Environmental eXtender)-Paddy 모형을 이용하여 CO₂ 농도 상승, 기후변화, 작물생육에 따른 논벼 증발산량 및 필요수량 변화에 관한 연구를 수행하였다.

또한 기후변화는 비점오염 배출 비중을 높일 것으로 예상되고 있다. 제2차 비점오염원관리 종합대책 보고서(관계부처합동, 2012)에 따르면 2010년을 기준으로 수질오염물질 배출량은 비점오염원의 비율이 BOD 부하량의 68.3% T-P 부하량의 58.9%를 차지하고 있으며 기후변화에 따른 연평균 강수량의 증가와 강우강도의 증가로 비점오염 부하량이 증가할 것으로 예상된다. 농업의 물 환경 영향평가와 비점오염 배출 완화를 위하여 환경부는 배출농도규제만으로는 현재의 수질문제를 해결하기 어렵다는 인식하에 토지이용 별 비점오염 배출 원단위를 산정하고 수질오염총량관리제도를 시행하고 있다 (Ahn and Jeong, 2008). 그러나 우리나라의 수질오염총량관리제도는 점오염원에 집중되어왔으며 비점오염 저감을 위한 기술적, 제도적 지원이 부족한 실정이다. 2010년 환경부 물관리분야 국고 2.2조 원 중 비점오염관리 분야는 457억 원으로 점오염원 분야에 비해 약 2%에 불과하였다 (관계부처합동, 2012). 한편, 미국은 우리나라보다 앞서 수질오염총량관리제를 시행하였다. 수질오염총량관리제의 목표달성을 위하여 일찍이 관리대상에 비점오염원을 포함하였으며 비점오염원 관리를 위하여 보조금 지원 등 인센티브 정책을 통해 농업인을 대상으로 자발적인 농경지 최적관리기법 (BMP: Best Management Program) 수행을 유도하고 있다.

인센티브 정책을 수행하기 위해서는 BMP의 효과에 관한 정보가

필요한데 과거에는 관측 자료를 이용한 트렌드 분석이나 두 지역 간의 쌍대비교가 수행되었으나 (Edwards *et al.*, 1997; Chow *et al.*, 1999) 최근에는 관측을 통한 농업부문 비점오염 정량화의 한계를 극복하기 위해 다양한 유역수문학적인 분석모형들이 개발되고 있으며 다양한 환경조건 및 관리조건을 고려한 비점오염 부하량 모의에 활용되고 있다 (Tuppad *et al.*, 2010). 그러나 SWAT (Soil and Water Association Tool) (Arnold *et al.*, 1994), HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran) (Donigan *et al.*, 1984) 등 대부분의 모형들은 중·대규모 유역 모형으로서 BMP의 결과를 효과적으로 분석하지 못하였으며, 복잡하고 불규칙적인 농경지관리에 대한 분석이 어려웠다 (Tuppad *et al.*, 2010). 한편 APEX 모형은 소규모 유역의 농경지 관리효과를 분석하기 위해 개발되었으며 관개배수, 고랑재배, 버퍼스트립, 비료 및 퇴비사용, 작물윤작, 방목, 농약살포, 경운 등 다양한 농업활동을 모의할 수 있어 가축분뇨의 관리와 여과대의 효과 분석 등에 사용되어왔다 (Flowers *et al.*, 1996; Arnold *et al.*, 1998; Williams *et al.*, 2006). 미국 USDA (United States Department of Agriculture) 산하 ARS (Agricultural Research Service)와 NRCS (Natural Resources Conservation Service), Texas A&M AgriLife Research는 2003년에 발족된 CEAP (Conservation Effects Assessment Project)를 공동으로 수행하여 APEX 모형과 SWAT 모형을 연계 운영하는 방안을 채택하였다 (White *et al.*, 2014).

논벼 재배는 경작 방법 및 물 관리방법에 따라 비점오염 배출 양상이 다르다 (Song *et al.*, 2012). 논에 과잉 투입된 양분은 하류 하천 및 호소 부영양화에 원인이 되나 관개수중 양분을 활용하여 벼를 재

배할 경우 인공습지로서 수질을 정화하는 기능을 수행할 수 있다 (Roh *et al.*, 2005). 논은 벼 재배 기간에 담수관개와 낙수라는 특수한 물관리가 이루어지며 비료사용량, 시비방법, 시비시기, 물관리 방법 및 강수량에 따라 같은 논이라도 비점오염 부하량이 상이하기 때문에 논에서의 비점오염 부하량을 합리적으로 정량화하는데 어려움이 따른다 (Yoon *et al.*, 2002; Jeon *et al.*, 2005). CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems)-Paddy (Seo *et al.*, 2002), HSPF-Paddy (Jeon *et al.*, 2007), SWAT-Paddy (Tsuchiya *et al.*, 2018) 등 논 비점오염 부하량을 평가하고자 모형이 개발되었으나 농업활동을 통한 논 비점오염 부하량 저감기술을 평가하는데 활용되기에는 미흡한 면이 있다. 국립농업과학원과 Texas A&M AgriLife Research (SWAT 및 EPIC/APEX 모형의 개발주체)는 국제공동연구를 통해 논 재배환경을 반영하여 비점오염 부하량을 평가하고 농경지 관리에 따른 저감효과를 분석할 수 있도록 APEX-Paddy 모형을 개발하였으며 (Choi *et al.*, 2017a) 지속적인 개선이 이루어지고 있다.

전지구기후모형(GCM, General Circulation Model)은 실제 기후시스템을 단순화시킨 모형으로서 필연적으로 불확실성을 내포하게 된다 (NIMR, 2009). GCM 기술이 지속적으로 발전하면서 자연적인 기후현상을 보다 현실성 있게 모의하게 되었지만 미래 기후 예측 결과는 여전히 많은 불확실성 (Uncertainty)을 내포하고 있다 (Chung *et al.*, 2015). 어떠한 GCM을 선정하는가에 따라 모형은 증발산량, 필요수량, 유출량 등의 예측에 상반된 결과를 도출하기도 한다 (Cho *et al.*, 2015). 따라서 단일 GCM만을 사용할 경우 불확실성을 반영하지 못하는 한계가 있으며 불확실한 예측 결과를 정책에 반영할

경우 정책결정자가 옳지 못한 판단을 내릴 위험이 있다. 이러한 예측 불확실성을 극복하기 위해 최근에는 여러 가지 GCMs를 활용하는 다중모형앙상블 (MME, Multi-Model Ensemble) 방법을 적용하여 기후변화 영향을 평가하고 GCMs의 불확실성을 평가하는 연구가 수행되고 있다 (Lee and Kim, 2012; Yoo *et al.*, 2015).

또한, 지금까지의 농업부문 기후변화 영향평가와 적응대책에 관한 연구는 물, 식량, 환경영향 분야에 있어 개별적으로 수행되어왔다. 최근에는 미래 식량 생산 변화에 대응하고 농업수자원 계획 수립, 지속가능한 농업 실현을 위하여 물, 식량, 에너지 등 다양한 분야의 상호간의 연계성 (Nexus)을 고려한 종합적인 분석이 이루어지고 있다 (Lee *et al.*, 2018).

따라서 기후변화에 따른 논벼 생산 및 필요수량, 비점오염 유출 부하량 등의 논 재배환경을 종합적으로 평가할 수 있는 도구와 연구방법 정립이 필요하며 이를 위해 모형의 지속적인 개발과 다양한 기후변화 시나리오를 이용한 예측 연구가 필요하다.

1.2 연구목적

본 연구에서는 논 재배환경을 고려한 논벼 생산량 및 물 환경 영향을 평가하기 위하여 APEX-Paddy 모형을 개발·개선하고 모형의 보·검정 과정을 통하여 모형의 적용성을 검증하고자 하였다. 또한, APEX-Paddy 모형을 이용한 기후변화 영향평가로서 전지구기후모형의 다중모형앙상블을 이용하여 논벼 생산량, 필요수량, 질소 유출 부하량 변화를 평가하고자 하였다.

본 연구에서 사용된 ‘물 환경’은 증발산량, 필요수량, 유출량 등의 농경지 물 순환 요소와 질소, 인, 토사 유출 부하량 등 하류 수계 수질에 영향을 주는 농경지 비점오염원의 개념을 포함한다. 본 연구에서는 물 환경 영향평가 범위를 물 순환 요소의 경우 기후변화와 밀접한 연관이 있는 증발산량, 필요수량, 유출량으로 제한하였으며 비점오염원의 경우 질소 유출 부하량으로 제한하였다. ‘논벼 생산량’은 조곡 (껍질을 벗기지 않고 가공도 하지 않은 상태의 낱알)을 기준으로 하고 있으며 본 연구에 사용된 APEX-Paddy 모형의 특성에 따라 건중량으로 산정하였다.

본 연구의 공간적 범위는 농경지 단위이며 유역단위에서 수행되는 하도 홍수추적은 고려되지 않았다. 기상자료는 해당 시군의 인근 중관기상측후소 자료를 이용하였으며 토양자료는 해당 시군의 대표 토양통 자료를 사용하여 시군단위로 결과를 작성하였다. 시간적 범위는 GCMs의 기준기간인 1976년~2005년과 미래 예측 기간인 2011~2100년으로 결정하였다.

제 2 장 연 구 사

2.1 논벼 생산 및 물 환경 영향평가 모형

2.1.1 논벼 생산 및 물 환경 영향 관측

벼 생산량 및 품질은 등숙기간의 온도에 영향을 크게 받는데 우리나라의 경우 자포니카 벼에 알맞은 등숙기간 (출수후 40일)의 일 평균기온은 21℃~23℃이다 (농촌진흥청, 1981). 평야지에서 등숙기 평균기온이 21℃보다 1℃ 낮은 20℃가 되면 7%가 감수하여 저온의 영향을 받았으며 23℃보다 1℃ 높은 24℃일 경우 5%가 감수하여 고온의 영향을 받았다 (Yun and Lee, 2001). 고온피해의 원인은 출수 후 생육온도가 크게 상승함에 따라 등숙기간이 단축되어 종실중이 작아지고 (Sato and Inaba, 1976, Lee *et al.*, 2011), 고온에 의한 불임 증가 (Satake and Yoshida, 1978, Jagadashi *et al.*, 2007)로 수량 및 품질이 저하되기 때문인 것으로 나타났다.

논 관개를 위한 수리구조물을 설계하고 운영하기 위하여 논 필요수량을 산정할 필요가 있다. 논 필요수량은 증발산량, 침투량, 유효우량 등이 고려되며 이 중 작물 생육과 기상 조건에 따라 변화가 큰 증발산량이 주요하다. 농업개발공사 서울대학교 농업개발연구소 (1986)는 5년간 우리나라 9개 지역에서 유저형, 무저형 라이시미터를 이용하여 조생종, 중생종 만생종 벼의 증발산량을 산정하였으며 농림부와 농어촌진흥공사 (1997)은 수원과 대구 지역을 대상으로 라이시미터를 이용하여 직파 재배 논외 증발산량을 측정하였다. 수원 지역 기계이앙 벼의 경우 조생종 증발산량은 442.0 mm ~ 602.0

mm, 중생종은 443.8 mm ~ 581.4 mm, 만생종은 471.9 mm ~ 631.6 mm로 나타났다.

Roh *et al.* (2005)은 벼논에서의 질소순환을 정량화함으로써 논벼 재배가 수질에 미치는 영향을 평가하였다. 잠재적인 질소 수계 질소 유출 부하량은 26.7 kg/ha이며 시비량 110 kg/ha, 관개수 수질 농도가 3.0 mg/L 이상일 경우 벼논은 수질정화기능이 있으나 시비량 120 kg/ha 에서는 관개수 수질 농도가 6.0 mg/L 이하에서 수질정화 기능을 수행할 수 있다고 평가하였다. 그러나 논외의 질소 유출 부하량은 농가의 물관리에 의해 크게 좌우되므로 Roh *et al.* (2005)의 연구에서는 질소 유출 부하량을 직접 측정하지 못하였고 질소의 총 공급량에서 대기유출, 작물이용, 토양잔류량 부분을 제외함으로써 잠재 부하량을 추정하였다는 한계가 있다.

Jeon *et al.* (2005)는 지표수 관개논과 지하수 관개논에 대하여 필지 단위 비점오염 부하량을 직접 측정하였는데 지표수 관개논의 경우 총 부하량이 질소 46.4~72.8 kg/ha, 인 1.25~1.43 kg/ha를 지하수 관개논의 경우 질소 35.4~37.8 kg/ha, 인 0.67~1.57 kg/ha를 기록하였다고 밝혔다. Kim *et al.* (2016)은 논에서의 물꼬관리, 완효성비료 시비에 따른 포장단위 비점오염 부하량을 관측하였으며 총 질소 부하량은 관행이 15.5 kg/ha, 물꼬관리구가 11.7 kg/ha, 완효성비료 시비구가 8.5 kg/ha이며 총 인 부하량은 1.39 kg/ha, 물꼬관리구가 1.02 kg/ha, 완효성비료 시비구가 0.69 kg/ha으로 나타났다고 보고하였다.

Kim *et al.* (2005)는 이천 하성평탄지 광역논 (14.2 ha)에 대하여 재배기간 중 양분 유출량을 측정한 결과 2002년 총 질소 부하량은 22.1 kg/ha, 총 인 부하량은 3.6 kg/ha, 2003년 총 질소 부하량은 17.3 kg/ha, 총 인 부하량은 5.0 kg/ha로 관측되었다고 보고하였다. Yoon *et al.* (2006)은 광역

논 (105 ha)을 대상으로 4년간 (1999~2002) 논에 비점오염 부하량을 측정
한 결과 총 질소 부하량은 평균 59.7 kg/ha, 총 인 부하량은 평균 1.43
kg/ha로 나타났다. Choi *et al.* (2015)은 함평 학야지구, 순창 적성지구 광
역논 (각각 13.7, 8.1 ha)에 대하여 4년간 (2009~2012) 양분유출을 관측하
여 환경부 비점오염 원단위 부하량 상정방법 (국립환경과학원, 2012)을 적
용한 결과 총 질소 부하량은 14.6 kg/ha, 총 인 부하량은 2.01 kg/ha인 것
으로 평가하였다.

2.1.2 논벼 생산 및 물 환경 영향평가 모형 개발 및 활용

통제된 실험공간이 아닌 변수가 많은 현장에서 논벼 생산 및 물 환경 영향을 정확히 관측하기 어렵고 매년 기상조건이 급변하기 때문에 관측결과와 연차 간 차이도 매우 크다. 또한, 관측을 통한 연구는 비용과 시간제약이 커 다양한 환경조건에 대한 분석이 불가능하다. 따라서, 기후, 토양, 지형 등 다양한 환경조건과 농업활동에 대한 논벼 생산 및 물 환경 영향을 평가하기 위하여 다양한 프로세스 기반의 모형이 개발되고 있으며 이를 활용한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

논벼 생산량 예측과 관련하여 대표적으로 Oryza2000 (Kropff *et al.*, 1994; Bouman *et al.*, 2001) 모형과 CERES-Rice 모형 등이 개발되어 활용되고 있다. Matthews *et al.* (1995)은 Oryza 모형과 SIMRIW 모형 (Horie *et al.*, 1995) 을, Lai *et al.* (1998)은 CERES-Rice 모형을 사용하여 기온상승과 이산화탄소 농도의 변화에 따른 논벼 생산량 변화를 분석한 결과 모형 간 반응정도의 차이가 있으나 이산화탄소 농도 상승은 생산량에 긍정적인 영향을, 기온 상승은 생산량에 부정적인 영향을 미치는 것으로 보고하였다.

논 물 관리를 위해 한국농어촌공사는 수리시설물 모의조작 시스템 (HOMWRS, Hydrological Operation Model for Water Resources System)을 개발하여 운영하고 있다 (농어촌진흥공사, 1998). HOMWRS는 논 물수지를 통해 논 필요수량을 산정하며 FAO Modified Penman 공식 (Doorenbos, 1975)을 이용하여 기준작물 증발산량을 산정한다. Yoo *et al.* (2006)은 Modified Penman 공식과 Allen *et al.* (1998)의 FAO Penman-Monteith 공식에 따른 논벼 작

물계수를 산정하였다.

농경지 물 환경 모의를 위한 모형은 적용 규모에 따라 분류할 수 있다. 대표적인 중·대규모 유역 모형으로서 SWAT (Soil and Water Association Tool) (Arnold *et al.*, 1994), HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran) (Donigan *et al.*, 1984), SWMM5 (Storm Water Management Model) (Huber *et al.*, 2005) 등이 있으며 필지 및 소유역 모형으로서 EPIC (Environmental Policy Integrated Climate) (Williams *et al.*, 1984), CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Systems) (Knisel, 1980), APEX (Agricultural Policy & Environmental eXtender Model) (Williams *et al.*, 2008b) 등이 개발되고 지속적으로 개선, 발전이 이루어지고 있다.

논벼 재배 환경에 대한 모의를 위해 Seo *et al.* (2002)은 논 유출특성을 고려하여 CREAMS-Paddy를 개발하였으며 Song *et al.* (2012)은 CREAMS-Paddy 모형을 실측자료를 바탕으로 보·검정하고 논 물 관리 및 시비관리에 따른 비점오염 유출 부하량 저감효과를 평가하였다. Jeon *et al.* (2007)은 HSPF-Paddy 모형을 개발함으로써 유역 내에서 논이 수계에 미치는 영향을 평가할 수 있도록 하였으며 Kim *et al.* (2014)는 HSPF-Paddy 모형을 적용하여 보청천 유역의 물 수지를 평가하였다. Sakaguchi *et al.* (2014)는 SWAT 모형의 pothole 모듈을 응용하여 논 물수지 모의 방법을 고안하였으며 Tsuchiya *et al.* (2018) pothole 모듈 응용 방식의 문제점을 지적하고 새로운 논 물수지 모듈을 구현한 SWAT-Paddy 모형을 개발하였다. Choi *et al.* (2017a)은 APEX 모형에 썩레질, 이앙, 물관리 특성을 반영하여 APEX-Paddy 모형을 개발하고 실측자료를 바탕으로

모형을 보·검정함으로써 활용 가능성을 평가하였다.

2.2 논벼 재배 환경의 기후변화 영향평가

기후변화가 작물 성장과 생육에 미치는 영향에 대한 연구는 90년대 이전부터 수행되어왔다. 1990년 IPCC 1차 보고서가 발표된 이후로 기후변화 시나리오와 농업 및 다양한 분야에 대한 영향평가 연구가 본격적으로 수행되고 있다. 현재까지 5차보고서가 발표되었으며 2021년에 6차 보고서가 발표될 예정이다. 이와 관련하여 다양한 실험연구와 모형을 이용한 연구가 지속적으로 수행되고 있다.

2.2.1 기후변화와 작물반응

가. CO₂ 농도 상승 조건에서의 작물반응

식물의 생장이 CO₂ 농도에 영향을 받는다는 사실은 1804년, Saussure에 의해 최초로 보고되었다. Saussure는 광합성을 하는 데 필요한 탄소의 공급원이 공기 중의 CO₂라는 사실을 확인하였으며 주변 공기보다 높은 CO₂ 농도에서 완두콩이 더 잘 자란다는 사실을 발견하였다. 이후 많은 연구자들이 소쉬르의 연구를 참고하여 CO₂ 농도의 변화와 식물반응 실험들을 수행하였다.

Kimball (1983)은 CO₂ 농도의 변화와 식물반응 실험에 관하여 64년 간 발간된 70개 이상의 논문을 참조하였으며 37 종, 430 실험에 대한 자료를 정리한 결과 CO₂ 농도 (330 ppm)를 배증 (660 ppm) 조건에서 작물 생산량은 약 33%가 증가하는 것으로 나타났으며 99.9%의 신뢰구간은 24~43%의 범위를 나타낸다고 보고하였다. 또한 CO₂ 농도 상승에 따른 식물

생장 및 생산량 증가 반응은 벼와 같이 공기 중의 CO₂를 그대로 이용하는 C3 식물이 이미 체내에서 CO₂ 농도를 높여 이용하는 C4 식물 (ex. 옥수수)에 비해 크다고 하였다 (Kimball, 1983). Patterson and Flint (1980), Carlson and Bazzaz (1980)은 CO₂ 증가에 대한 C4 식물의 반응은 C3 식물의 1/4 수준이라 보고하였다. Riley and Hodges (1969)는 CO₂ 농도를 300 ppm에서 1000 ppm으로 높였을 경우 쌀 (*Oryza sativa* L.)의 생산량이 19~40%가 증가하였다고 보고하였다. Kobayashi *et al.* (1999)은 자포니카 벼 (*Akitakomachi*) 군락에 CO₂ 농도를 약 200 ppm 높여 재배하는 FACE (Free-Air CO₂ Enrichment) 실험에서 출수기 생장 및 생육을 조사한 결과 처리구가 대조구 보다 바이오매스가 이삭은 33%, 줄기와 엽초는 24%, 엽신은 6%, 뿌리는 13% 증가하고 이삭수는 10~12%가 증가한다는 결론을 도출하였다 (Yun *et al.*, 2001). Kim *et al.* (2003)은 같은 실험조건에서 질소시비를 4 kgN/10a 수준으로 적은 시비를 하였을 경우 CO₂ 농도 상승 처리에 따라 조곡 생산량 (grain yield)이 7% 증가한 반면 9 kgN/10a, 15 kgN/10a 수준의 시비구에서는 15%가 증가하였다고 보고하였다. Hasegawa *et al.* (2013)은 네 품종의 벼 군락에 대하여 같은 실험조건에서 현미생산량 (brown rice yield)을 비교한 결과 CO₂ 농도 상승 처리구가 대조구보다 평균 17% 증가하였다고 평가하였다. 따라서, 대기 중 CO₂ 농도의 상승은 작물 바이오매스 생산을 증가시킨다는 가정이 사실로 증명되었으며, 이어서 CO₂ 농도 상승에 의한 지구온난화가 작물 생장과 생육에 미치는 영향이 함께 고려되어야 할 것이다.

나. 기온 상승 조건에서의 작물 반응

작물마다 생장 및 생육을 위한 기저온도와 최적온도가 있다. 기저

온도는 품종마다 다르지만 일반적으로 밀은 0℃, 감자는 7℃ 벼와 콩, 옥수수는 10℃로 알려져 있다. 최적온도는 C4 식물이 C3 식물에 비해 높은 편이다. C3 식물인 벼와 밀은 20~25℃가 최적온도로 추정되며 C4 식물인 옥수수는 30~35℃가 최적온도로 추정된다 (Bonhomme, 2000).

기저온도 이상의 온도 누계를 유효적산온도 (GDD: Growing Degree Day)라 하며 작물의 생육단계는 유효적산온도에 영향을 받는다. 이러한 개념은 Reaumur (1735)에 의해 처음 소개되었다 (Ritchie and Nesmith, 1991). 기온상승은 유효적산온도를 빠르게 채워 작물이 성숙기에 이르는 시기를 앞당긴다. 따라서 작물은 충분한 생체량을 쌓기도 전에 수확기에 도달하여 결국 생산량이 감소하게 된다.

열대작물인 벼의 경우 지구 평균기온이 높아지면 재배가능 지역과 시기가 확대되겠으나 현재의 생산량을 유지하거나 안전한 생산을 도모하려면 상당한 적응기술이 필요하다 (Yun *et al.*, 2001). Peng *et al.* (2004)은 1992~2003년 필리핀 국제미작연구소 (IRRI: International Rice Research Institute)에서 1979년~2003년 기간에 대하여 생산량과 기상자료를 비교분석한 결과 지구온난화에 따라 생육기간의 일 최저온도가 1℃ 상승함에 따라 벼 수량이 10% 감소하였다고 보고하였다. 그러므로 현재 재배되는 벼 품종을 그대로 재배할 경우 기후변화에 따른 기온의 증가는 벼 수량을 감소시키고 품질을 악화시킬 우려가 있다 (Lee *et al.*, 2011).

2.2.2 기후변화와 필요수량

대기 중 CO₂ 농도의 증가와 기온상승에 따른 증발산량의 변화, 강수량 및 강수특성의 변화는 농경지 수문순환 변화에 영향을 줄 것으로 예상된다 (Kim *et al.*, 2004; Chung, 2010; Lee *et al.*, 2012; Jang *et al.*, 2015). 따라서 기후변화를 고려한 농업수자원 계획 수립을 위하여 기후변화와 농업 수자원에 대한 많은 연구가 수행되었다.

증발산량은 조용수량, 단위용수량 산정 등 수리구조물의 설계·운영을 위한 가장 기본이 되는 자료이다. 많은 연구가 통제된 환경에서 기온 및 CO₂ 조건을 설정함으로써 작물의 증발산량 변화를 평가하고자 하였다.

Jones *et al.* (1985)은 콩을 대상으로 기온을 28℃에서 35℃로 증가시켜가며 증발산량을 조사한 결과 1℃ 올라갈 때 마다 콩의 일 증산량이 4~5% 증가한다고 보고하였다. Rosenberg *et al.* (1990)도 기온이 1℃ 올라갈 때 일 증발산량이 6.7%가 증가한다고 하였다. 그러나 이러한 연구 결과는 단기간의 실험결과로서 작물생육 전 기간에 대한 연구는 아니었다. 한편, Mera *et al.* (2006)와 Tao and Zhang (2011)은 기온 상승으로 작물이 유효적산온도를 빠르게 채워 생육기간이 줄어들기 때문에 C3작물과 C4작물 모두 생육기간의 기온이 올라감에 따라 총 증발산량이 감소한다고 보고하였다.

대기 중 CO₂ 농도가 상승하면 증발산량이 줄어든다는 연구 결과도 다수 제시되고 있다. Allen *et al.* (2003)은 콩에 대해 기온상승조건(18~28℃, 30~40℃, 34~44℃)과 CO₂ 농도 조건 (350 ppm, 700 ppm)을 구성하여 분석한 결과 기온상승 조건에 대하여 기온이 1℃ 상승할 경우 증발산량이 6.4% 증가한다고 평가하였으며 CO₂ 농도

배증 조건에서 증발산량이 9% 감소한다고 밝혔다. Kimball and Idso (1983)는 330 ppm을 기준으로 CO₂ 농도 배증조건에서 콩의 증산량을 산정하였는데 CO₂ 농도 660 ppm에서 증산량이 34±17%가 감소하는 것으로 나타났다. Kimball *et al.* (1995)은 FACE를 이용하여 밀에 대해 증발산량을 비교한 결과 대조구 (370 ppm CO₂)에 비하여 처리구 (550 ppm CO₂)의 재배기간 중 증발산량이 평균 8% 감소하였다고 밝혔다. Xu *et al.* (2016)은 CO₂ 농도 증가에 따른 증발산량 감소는 첫째, 식물이 기공을 자주 열지 않아도 광합성에 필요한 탄소를 충분히 얻을 수 있으며 둘째, 대기 CO₂ 농도가 높으면 공변세포의 앱시스산 (ABA: Absisic Acid)이 빠르게 증가하며 이에 따라 공변세포의 칼륨 및 물의 방출이 촉진되어 식물이 기공을 닫기 때문이라고 원인을 밝혔다.

Adams *et al.* (1990)과 Allen *et al.* (1991)은 실험 자료와 두 개의 GCMs 시나리오, 작물생육모형을 이용하여 기후변화에 따른 농업용수 수요량 변화에 관하여 분석한 바 있다. 분석결과 기후변화 시나리오에 따라 작물의 필요수량은 어떠한 변화도 보이지 않았다. McCabe and Wolock (1992), Ramirez and Finnerty (1996) 역시 같은 결과를 도출하였다. 그러나 Doll (2002)은 GIM (Global Irrigation Model) (Doll and Siebert, 2001)을 이용하여 농업용수 수요량 변화를 4개의 GCMs에 대해 지역별로 산정한 결과 전 세계 농업용수 수요량은 baseline (1961~1990) 대비 2070년대 (2070~2079)에 5~8%가 증가할 것으로 평가하였으며 남아시아는 15% 증가, 중앙아시아는 4~12% 감소, 동아시아는 2~6% 증가할 것으로 예측하였다.

는 필요수량과 관련하여 Silva *et al.* (2007)은 IPCC SRES A2, B2 기후변화 시나리오를 CROPWAT 모형에 적용한 결과 2050년대

에는 논 필요수량이 평년에 비해 증가 (A2: 23%, B2: 13%)할 것으로 예측하였으며 증발산량 증가 (A2: 3.5%, B2: 3%)와 강수량 감소 (A2: 17%, B2: 9%)가 원인인 것으로 평가하였다. Chung *et al.* (2011)은 Silva *et al.* (2007)과 같은 방법으로 우리나라의 논 필요수량을 산정한 결과 강수량은 크게 증가하나 (25~53%) 유효수량은 2~8% 증가에 그쳤으며 논 필요수량은 1~8%가 감소할 것으로 예측하였다. Yun *et al.* (2011)은 18,000여개 농업용 저수지를 대상으로 HOMWRS 모형을 이용하여 기후변화 영향을 분석한 결과 기후변화에 따라 증발산량 상승하여 용수 수요량이 증가하는 것으로 나타났다. 그러나, 어떤 지역은 유효수량이 크게 증가하여 용수 수요량이 오히려 감소하는 것으로 예측된다고 하였다. Yoo *et al.* (2012)도 고해상도 기후시나리오와 논벼의 일별 물수지식을 이용하여 논 용수 수요량을 추정한 결과 논벼의 작물 증발산량이 2085년대 (2071~2100)에 기준년도에 비하여 9.3% 증가하나 논 용수 수요량은 유효수량 증가로 인해 3.2% 증가에 그친다고 보고하였다.

2.2.3 기후변화와 물 환경 영향

물 환경의 변화와 관련하여 Murdoch *et al.* (2000)은 기후변화에 따른 강우패턴의 변화와 기온상승은 지표수의 수질에 큰 영향을 줄 것으로 전망하였다. 그는 기후변화에 따른 지표수 수질 영향은 토지 이용변화에 따른 영향에 비하여 작지만 식생, 토양, 생분해 특성 변화로 인한 변화가 지표수 수질에 간접적인 영향을 줄 것으로 판단하였다. Murdoch *et al.* (1998)은 기온상승에 따라 토양미생물 활동이 활발해져 질산화 작용이 가속화 되고 이로 인해 질소 침출이 심

화될 것이라고 평가하였으며 Li *et al.* (2011)은 SWAT 모형을 이용하여 온도변화를 -2°C 에서 $+3^{\circ}\text{C}$ 까지 0.5°C 씩 변화를 주면서 유출량과 유사량, 질소와 인의 변화를 분석하였는데 기온 변화에 따른 유출량 변화는 $-0.81\% \sim 0.13\%$ 로 큰 변화를 보이지 않았지만 유사량의 경우 $+3^{\circ}\text{C}$ 에서 13.6% 가 증가하는 것으로 나타났으며 무기 질소는 40.2% 증가, 무기 인은 5.9% 증가하는 것으로 나타나 질소 유출 변화가 온도상승에 매우 민감한 것으로 평가하였다.

Hwang *et al.* (2006)은 발안저수지 유역을 대상으로 GWFL 모형에 SRES 기후변화시나리오를 적용한 결과 연 강수량 변화가 큰 (15.6%) A2 시나리오에서 유출량, 유사량, 총 질소, 총 인 부하량이 각각 15.6% , 38.8% , 6.8% , 17.0% 가 증가하였지만, 연 강수량 변화가 가장 작은 (2.5%) B1 시나리오에서는 유출량이 0.4% 감소하였으나, 유사량, 총 질소, 총 인의 부하량은 각각 14.6% , 3.0% , 7.2% 가 증가하는 것으로 나타났다. Lee *et al.* (2015)은 RCP8.5 시나리오와 BASIN/HSPF 모형을 이용하여 영산강 유역의 수질영향을 예측한 결과 기후변화에 따라 총 질소 부하량이 최대 76% , 총 인 부하량이 최대 70% 가 증가하는 것으로 평가하였다.

제 3 장 논 환경 모형 개발 및 적용성 평가

3.1 APEX-Paddy 모형 개발

3.1.1 APEX 모형

APEX (Agricultural Policy/Environmental eXtender) 모형은 농장 및 소유역 규모의 농업지역에 대하여 농업활동이 토양 및 물 환경에 미치는 영향을 평가하기 위해 미 연방정부 환경보호국 (USEPA : United State Environmental Protection Agency)의 지원을 받아 개발되었다. APEX 모형은 지형 및 토양특성, 기후, 관개방법, 작물 생육 및 작물 간 경합 등의 요소를 고려하여 경운, 시비, 관개, 작물 선택 및 윤작, 농약 살포, 최적관리기법 (BMPs : Best Management Practices) 등의 농장의 관리전략을 수립하고 환경영향을 평가할 수 있다. 이외에도 APEX 모형은 대기 중 CO₂ 농도와 기후변화를 고려하여 작물의 생장 (엽면적 지수 및 바이오매스의 증가) 및 생산량 변화를 모의할 수 있다. APEX 모형은 일 단위로 모의되는 과정기반모형 (process based model)이며 일부 과정은 시간단위 또는 그보다 더 짧은 시간 단위에 대한 모의 구동이 가능하다.

APEX 모형의 각 필지별 모의 모듈은 1980년대 초 토양침식이 농업 생산성에 미치는 영향을 평가하기 위해 개발된 EPIC (Environmental Policy Integrated Climate)모형 (Williams *et al.*, 1984)에서 유래되었다. EPIC 모형은 CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems) 모형 (Knisel, 1980), SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural

Basins) 모형 (Williams *et al.*, 1985)의 세부모듈을 이용하여 작성되었으며 이후 GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems)모형 (Leonard *et al.*, 1987)의 농약 모듈이 추가되었다. EPIC 모형은 1985년 미국의 2차 RCA (Resources Conservation Act)에 적용된 이후, 지속적인 확장과 개선을 거쳐 윤작, 경운, 관개일정 관리, 배수, 비료 및 농약 사용 등 농업경영의 다양한 관리요소를 변경하여 모의할 수 있게 되었다. APEX 모형은 농장규모에 국한된 EPIC 모형을 토사, 영양물질 추적 모듈을 추가함으로써 모의 규모를 농장 및 소규모 유역으로 확장하였다 (Williams *et al.*, 2006).

3.1.2 APEX-Paddy 모형

가. APEX-Paddy 모형의 개요

국립농업과학원과 Texas A&M AgriLife Research는 국제공동연구를 통하여 APEX-Paddy 모형을 개발하였다 (국립농업과학원, 2015). APEX-Paddy 모형의 기본 알고리즘은 논벼 재배환경을 현실적으로 모의할 수 있도록 논 물관리, 썩레질, 이앙 등으로 구성된다. 일 단위 논에서의 물, 양분 수지에 관하여 APEX 모형보다 정확하게 모의할 수 있게 개선되었으며 논의 저류기능 등 보전 효과가 구현되었다.

APEX-Paddy 모형의 개발과정은 Table 3.1과 같다. 2015년 2월에 초기버전의 APEX-Paddy 모형을 개발하였다. 초기버전의 경우 논 물꼬 설치 및 관개에 의한 물 층 생성, 논 물수지 및 양분수지를 모의할 수 있도록 모형을 구성하였으며 썩레질을 통한 물 층과 토양층의 교반을 모의할 수 있었다. 또한 이앙 조건을 설정할 수 있도록 모형을 구성하였으며 APEX-Paddy 모형의 구동을 위한 우리나라 논벼, 토양, 기후 데이터베이스를 구축하였다. 초기버전의 APEX-Paddy 모형은 국제공동연구 보고서 (국립농업과학원, 2015)와 APEX-Paddy 모형 평가 연구 (Choi *et al.*, 2017b)에 사용되었다.

2016년 10월에는 모형에 썩레질 용수량을 반영하였다. 썩레질 전 논 관개시 목표 담수심 외에 토층 30 cm 까지 토양수분 상태를 고려하여 토양을 포화시키는 수준의 관개량을 추가하도록 설정하였다. 또한 관개 시작 수위와 목표수위를 설정하였다. 기존의 APEX-Paddy 모형은 목표수위를 유지하도록 매일 관개하는 시나리오만을 선택할 수 있었으나 관개주기를 고려하여 관개 시작 수위와 목표수위를 설정

함으로써 보다 현실적인 논 관개 모의가 가능하도록 하였다. 개선된 APEX-Paddy 모형은 단일 GCM에 의한 논벼 생산량, 증발산량 평가 연구 (Choi *et al.*, 2017a)에 사용되었다.

2018년 1월에는 담수상태에서의 증발량을 모의할 수 있도록 모형을 개선하였다. APEX 모형은 증발량 산정 시 토양증발량을 모의하는데 APEX-Paddy 모형의 경우 물꼬 설치 및 관개 시 물 층이 형성되면 담수상태에서의 증발산량을 모의하도록 모형을 수정하였다. 새 버전의 APEX-Paddy 모형은 Multi-GCM 앙상블에 따른 논 증발산량 기후변화 영향평가 (Choi *et al.*, 2018)에 활용되었다. 2018년 11월에는 논 수면증발량 모의 정확도를 향상시킬 수 있도록 수면증발계수를 매개변수화 하여 입력자료를 통해 수정할 수 있도록 모형을 개선하였다.

Table 3.1 History of APEX-Paddy model development and application

Period	Contents implemented in the model	Applied reports, papers, or thesis	Contribution
2015.2.	<ul style="list-style-type: none"> • Water and nutrient budget in flooded condition • Puddle operation • Transplanting <ul style="list-style-type: none"> - Crop parameters for paddy rice • Soil, weather and operation database for Korea 	NAS (2015) ¹⁾ Choi <i>et al.</i> (2017b) ²⁾	M. K. Kim (RDA; Rural Development Administrations, Korea) conceived and designed APEX-Paddy model; J. Jeong (Texas A&M AgriLife Research, USA) build the model; S. K. Choi (NAS; National Institute of Agricultural Sciences, Korea) evaluated and modified the model.
2016.10.	<ul style="list-style-type: none"> • Puddling water requirement • Auto-irrigation module in paddy field <ul style="list-style-type: none"> - Target and trigger depth 	NAS (2017), NAS (2018), Choi <i>et al.</i> (2017a) ²⁾	S. K. Choi (NAS; National Institute of Agricultural Sciences, Korea) designed modified the APEX-Paddy model; J. Jeong (Texas A&M AgriLife Research, USA) build the model.
2018.1.	<ul style="list-style-type: none"> • Evapotranspiration under flooded condition 	Choi <i>et al.</i> (2018) ²⁾	
2018.11.	<ul style="list-style-type: none"> • Parameterization of coefficient of paddy field evaporation under flooded condition (η) 	This study ³⁾	

1) Report

2) Paper

3) Thesis

APEX-Paddy 모형은 논 물 관리에 따라 담수 (flooded)와 비 담수 (dry) 조건을 모의한다 (Fig. 3.1). 기존의 APEX 모형에 논둑과 물꼬높이 설정에 따른 담수조건 구현이 알고리즘을 추가되었으며, 낙수기와 비영농기 등의 비 담수 조건에서는 기존 밭작물에 대한 알고리즘을 따른다. 담수조건에서 지표유출은 물수지에 의한 배출로 모의되며, 토양침식은 썩레질에 의한 부유물질의 유출로 대체되었다 (Choi *et al.*, 2017a).

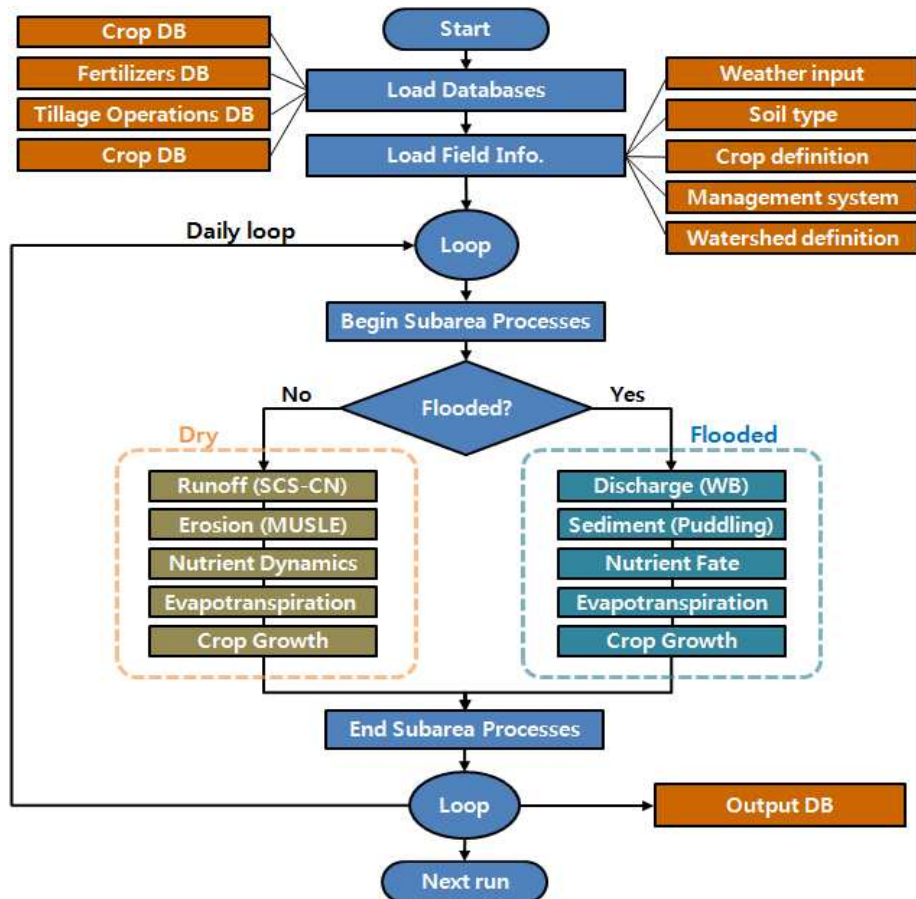


Fig. 3.1 Algorithm of the APEX-Paddy model (Choi *et al.*, 2017a)

나. 담수 조건에서의 물수지

담수조건에서 논 의 유출량은 Fig. 3.2와 같이 물수지에 의해 결정 된다 (Choi *et al.*, 2017b).

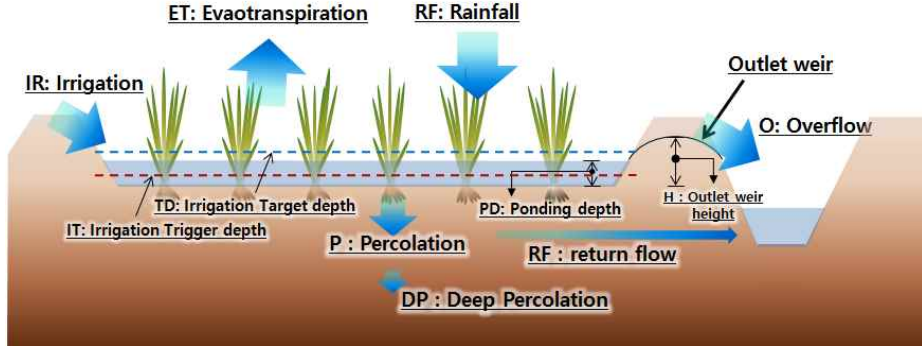


Fig. 3.2 Paddy water budget in APEX-Paddy model

APEX-Paddy 모형에서는 일 단위 논 의 물수지를 다음 순서로 산정 한다.

$$PD_t = PD_{t-1} + RF_t \quad (3.1a)$$

$$IR_t = TD - PD_t, \quad PD'_t = TD - ET_t - P_t, \quad \text{if } PD_t \leq IT \quad (3.1b)$$

$$PD'_t = PD_t - O_t - ET_t - P_t, \quad \text{if } PD_t > H$$

$$O_t = \sum_{h=1}^{24} \left(1.838 b \left(\frac{PD_{t,h} - H}{1000} \right)^{\frac{3}{2}} \right) \quad (3.1c)$$

$$PD_{t,h} = PD_t - \sum_i^h O_{t,i}$$

$$PD'_t = PD_t - ET_t - P_t, \quad \text{if } IT < PD_t \leq H \quad (3.1d)$$

여기서, t 는 모의시간 단위 (day), PD 는 논 의 담수심 (mm), PD' 은 유출, 증발산, 침투 발생 이후의 논 담수심 (mm), RF 는 강수량

(mm), IR 은 관개량 (mm), TD 는 관개시 목표 담수심 (mm), ET 는 증발산량 (mm), P 는 침투량 (mm), IT 는 관개를 시작하는 담수심 (mm), O 는 유출량 (mm), H 는 유출구 물꼬높이 (mm), b 는 유출구 너비 (m)이다.

논 수위가 물꼬높이보다 낮은 경우 일 마지막 (24 hr)의 논 수위는 전일 논 수위와 강수량의 합에 일 증발산량과 침투량을 뺀 값이 된다. 만약 논 수위가 IT 보다 낮을 경우 TD 와 현재 논 수위의 차이만큼 관개하도록 모형을 구성하였다 (Choi *et al.*, 2017b). 논 수위가 물꼬높이보다 높은 경우 배수량 (O)이 발생하는데, 배수량은 시간단위 모의 합산으로 결정된다. 시간단위 배수량은 Eq. 3.1과 같이 Francis 공식으로 산정되며 유출부의 수축은 없는 것으로 가정하였다. 경지정리가 된 논의 경우 일반적으로 3개의 배미구가 1 ha 크기인데, 논 한 배미구에는 약 20 cm 폭의 물꼬가 1개 있다. 따라서 1 ha 농경지의 물꼬 너비를 60 cm로 가정하면, 담수위와 물꼬 높이의 차이가 100.0 mm일 경우 배수량은 85.2 mm, 50.0 mm일 경우 배수량은 38.8 mm이 된다.



Fig. 3.3 Modeling of the paddy drainage characteristic

다. 담수 조건에서의 증발산량 산정

APEX-Paddy 모형은 논에서 증발산량 산정의 정확도를 높이기 위하여 기존 APEX 모형에서 사용되던 증발산량 산정방법과 달리 작물에 의한 차폐율과 논의 담수 및 배수조건을 고려할 수 있는 Sakaguchi *et al.* (2014)의 방법을 사용한다. 논의 담수조건에서의 수면증발량은 다음 식으로 산정된다 (Choi *et al.*, 2018).

$$V_{evap} = \eta \left(1 - \frac{LAI}{LAI_{evap}} \right) E_0 \quad \text{if } LAI > LAI_{evap}, \quad V_{evap} = 0 \quad (3.2a)$$

$$EVAP = V_{evap} + EP \quad (3.2b)$$

여기서, V_{evap} 는 일 증발량 (mm), $EVAP$ 는 일 증발산량 (mm), E_0 는 일 잠재증발산량 (mm), EP 는 일 작물증산량 (mm), LAI 는 엽면적지수, LAI_{evap} 는 수면에서의 증발이 일어나지 않을 수준으로 식물 캐노피가 증가하였을 경우의 엽면적지수이다. η 기본값은 수면증발 계수로서 SWAT 모형의 저수지 모듈에 적용된 수면증발계수인 0.6으로 설정되어있으며 (Neitsch *et al.*, 2002) LAI_{evap} 의 기본값은 Miyazaki *et al.* (2005)의 연구 결과에 따라 4.0으로 설정되어있다 (Choi *et al.*, 2018).

라. 담수 조건에서의 양분동태 모의

APEX 모형에서는 질소유출 모의 시 토양 내에서 수평방향으로 이동하는 질소의 농도를 유출량에 곱하여 산정한다 (Eq. A.28b). 그러나 APEX-Paddy 모형은 물꼬 설치 후 강우 및 관개가 이루어지면 표토층 위에 물 층 (water layer)을 생성하며, 물 층의 질소의 동태를 모의한다. 시비 후 썩레질을 할 경우 토양층과 물 층의 질소

배분이 이루어지며 강우에 의한 질소공급과 담수 중 추비에 의한 질소공급은 직접 물 층에 영향을 준다. 물 층의 질소는 침투를 통해 토양층에 공급되며 강우-유출에 따라 손실된다. 질산화, 휘산, 탈질 등의 경우는 수분이 포화된 토양층과 동일한 방식으로 모의된다 (Choi *et al.*, 2017a).

마. 썩레질 모의

기존의 농업 비점오염 모형은 논 재배환경을 모의할 수 있는 기능이 있어도 파종방식이 담수직파에 의해 모의되는 것이 대부분이었다. 그러나 한국을 포함한 동아시아 국가들은 이앙 재배를 하고 있으며, 이앙 전에는 흙덩이를 부수고 논을 평탄화하기 위하여 썩레질 (puddling)을 한다. Somura *et al.* (2009)은 영농기간 중 썩레질을 할 때 월등히 많은 양의 토사와 질소, 인 등의 오염원이 유출된다고 보고하였다. APEX-paddy 모형은 썩레질에 의한 토사유출 추정식을 추가하였고, 추적 모형에 따라 질소와 인에 대한 모의도 가능하다. 배출수 내 토사농도는 SWAT 모형의 수체 내 토사농도 추정식 (Neitsch *et al.*, 2011)이 적용되었다 (Choi *et al.*, 2017a).

$$C_{sed,f} = (C_{sed,i} - C_{sed,rsd})e^{-0.184 t d_{50}} + C_{sed,rsd} \quad (3.3a)$$

$$d_{50} = e^{0.41F_{clay} + 2.71F_{silt} + 5.7F_{sand}} \quad (3.3b)$$

여기서, $C_{sed,f}$ 는 수체 내 최종 토사 농도 (mg/L), $C_{sed,i}$ 는 썩레질 첫 날 수체 내 토사 농도 (mg/L), t 는 발생기간 (day), $C_{sed,rsd}$ 는 수체 내 토사의 잔여 농도 (mg/L)이다. d_{50} 은 토사의 직경 (μm), F_{clay} , F_{silt} , F_{sand} 는 표토의 점토, 미사, 모래의 비율이다.

바. 이양재배 모의

APEX 모형에서는 직파에 의한 생육모의만 가능하였으나 APEX-Paddy 모형에는 이양재배가 추가되었다 (Choi *et al.*, 2017a). APEX 모형에서는 파종을 한 날 이후부터 토양수분, 기온 조건에 따라 발아시기가 결정되며 발아 이후부터 엽면적지수가 증가하도록 모의된다. 만약 토양수분 조건이 논과 같이 포화조건일 경우 파종된 씨앗은 발아하지 않는다. 따라서 APEX-Paddy 모형은 이양재배를 선택할 경우에 초기 엽면적지수를 직접 입력할 수 있고, 이양 직후부터 생장이 모의되도록 하였다. 또한 논 재배환경에서의 벼 생육은 밭에서의 벼 생육과 큰 차이를 보인다. 따라서 이양 및 논 재배환경에 따른 논벼의 작물 모수 기본값은 Table 3.2와 같다.

*DLAP1*과 *DLAP2*는 엽면적지수의 성장과 관련된 모수로서 소수점 앞의 값은 전체 생육기간 중 해당 기간의 비율 (%)을, 소수점 뒤의 값은 그 때의 *LAI* 값을 의미한다. *RWPC1*과 *RWPC2*는 뿌리 바이오매스의 비율과 관련된 매개변수로서 *RWPC1*은 파종한 작물 출현 시 (벼논의 경우 유묘) 뿌리 바이오매스의 비율, *RWPC2*는 생육이 종료된 시점의 뿌리 바이오매스의 비율을 의미한다. *PPLP1*과 *PPLP2*는 작물 개체군 수에 따른 엽면적의 최대 엽면적에 대한 비율로서 소수점 왼쪽의 숫자는 작물의 개체군 수, 오른쪽의 숫자는 최대 엽면적에 대한 엽면적의 비율 (%)이다.

Table 3.2 Important crop parameters for simulating paddy rice compared with upland rice (Choi *et al.*, 2017a)

Parameters	Description	For upland rice (default)	For paddy rice
DLAP1	First point on optimal leaf area development curve.	30.01	28.01
DLAP2	Second point on optimal leaf area development curve.	70.95	51.95
RWPC1	Fraction of root weight at emergence.	0.40	0.47
RWPC2	Fraction of root weight at maturity.	0.20	0.07
PPLP1	Plant Population for Crops & Grass - 1st Point on curve.	125.60	65.30
PPLP2	Plant Population for Crops & Grass - 2nd Point on curve.	250.95	130.95

이앙에 따른 벼의 발아조건 및 기간이 삭제됨에 따라 벼 생육이 종료될 때 까지 필요한 누적 열단위, *PHU*는 이앙을 선택한 경우가 과종을 선택한 경우보다 상당히 감소한다. 이앙 벼의 작물 모수 기본값은 농촌진흥청 국립식량과학원 수원 시험포장에서 측정한 벼 생육특성 자료를 이용하여 도출하였다. 이앙에 사용되는 유묘의 초기 *LAI*값은 0.1이며 엽면적지수의 증가와 관련된 모수는 Fig. 3.4와 같이 수정하였다. 발벼 (벼에 관한 APEX 모형의 작물 모수 기본값)와 비교하여 논벼는 초기 생장이 월등히 빠른 것으로 나타났다. 이는 이앙재배를 할 경우 재배기간에서 유묘기가 생략되기 때문이라 판단된다. 따라서 *DLAP1*과 *DLAP2*를 각각 30.01에서 28.01, 70.95에서 51.95로 수정하였다 (Choi *et al.*, 2017a).

뿌리무게 (건중량)는 APEX 모형에서 생산량을 추정하는 데 중요한 요소이다. 생산량 추정에는 지상부 바이오매스만을 사용하므로 총 바이오매스에서 뿌리무게의 비율에 따라 생산량이 달라진다. 뿌리무게 비율에 관한 식은 다음과 같다.

$$RW = DM\{\epsilon(1 - HUI) + \gamma HUI\} \quad (3.4)$$

여기서, RW 는 작물 뿌리의 바이오매스 (ton/ha), DM 은 작물의 총 바이오매스 (ton/ha), ϵ 와 γ 는 작물 뿌리생장과 관련된 모수이다. 이앙기 유묘의 뿌리 바이오매스의 비율은 35%이며 뿌리의 생장은 출수기에 가까워오면 중단된다. 출수기의 뿌리 바이오매스 비율은 총 바이오매스의 16%이며 수확기에는 총 바이오매스의 7% 수준으로 감소한다 (Choi *et al.*, 2017a). 이에 따라 Fig. 3.5와 같이 논벼의 $RWPC1$ 과 $RWPC2$ 를 각각 0.40에서 0.47로, 0.20에서 0.07로 수정하였다 (Choi *et al.*, 2017a).

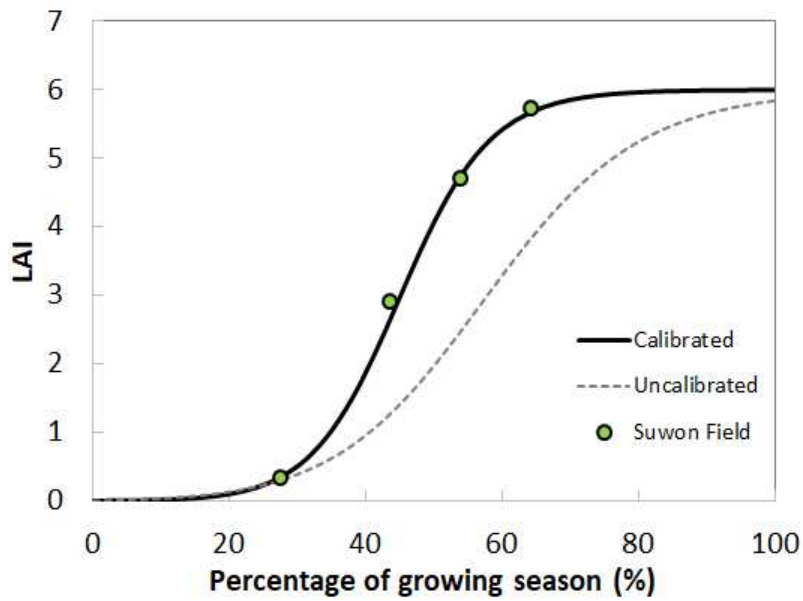


Fig. 3.4 Calibration of the leaf area development curve. LAI in the Y-axis stands for leaf area index (Choi *et al.*, 2017a)

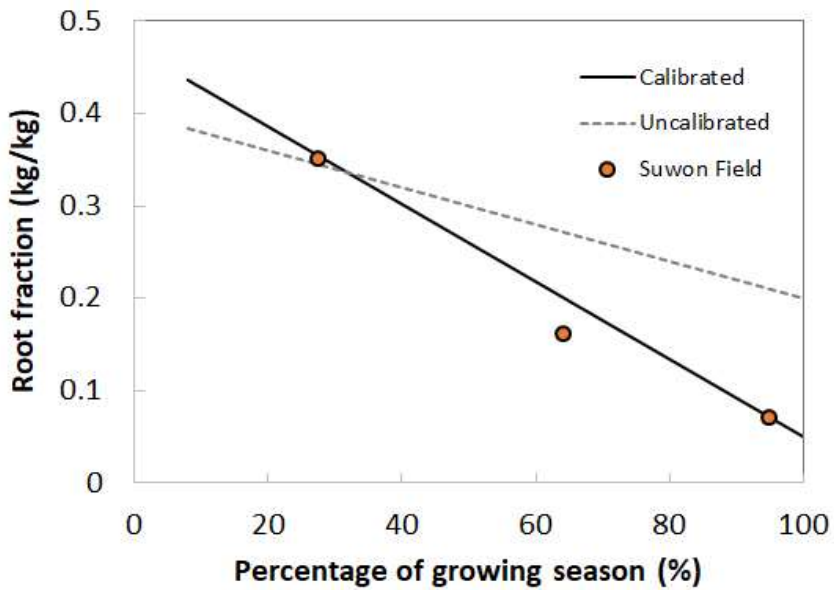


Fig. 3.5 Calibration of the root fraction curve (Choi *et al.*, 2017a)

3.2 APEX-Paddy 모형 적용성 평가

3.2.1 대상지역

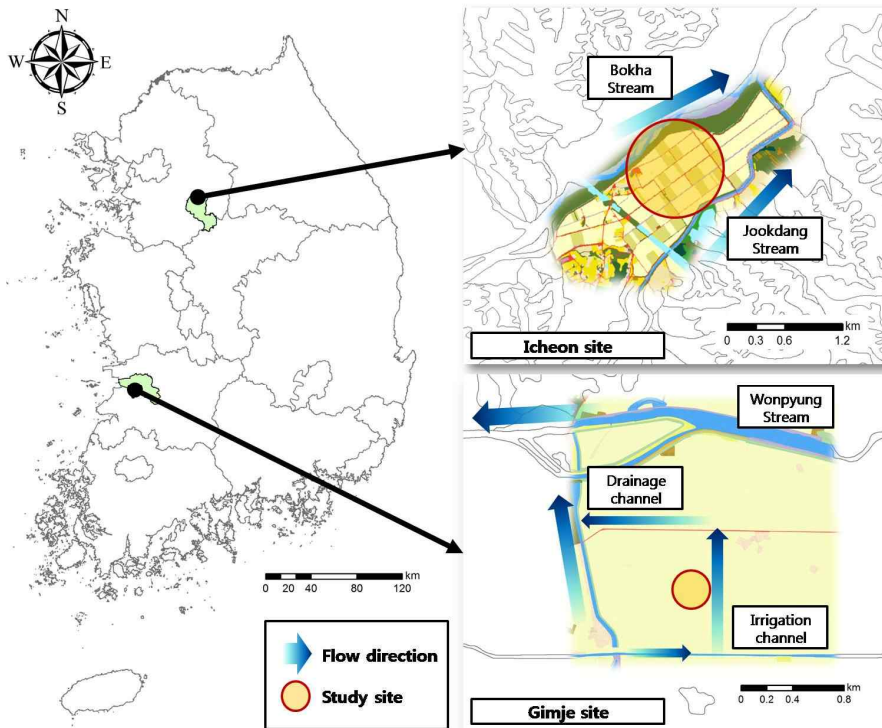
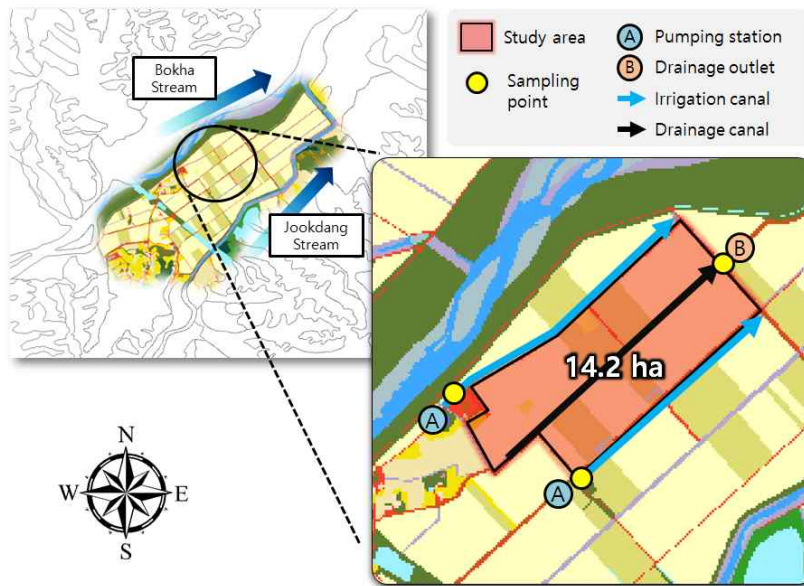


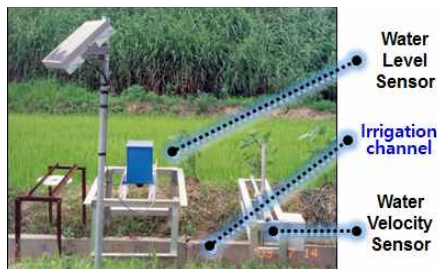
Fig. 3.6 Topographical maps of the study areas. The Icheon site is located in province of Gyeonggi, and the Gimje site is located in the province of Jeonbuk, South Korea

논 유출량, 질소유출량, 증발산량에 대하여 APEX-Paddy 모형의 보정 및 검정을 위하여 경기도 이천, 전라북도 김제 지역에서의 논 물수지 및 수질, 증발산량 관측 자료를 이용하였다. 이천 시험포장은 37°18'20.34"N, 127°30'40.46"E에 위치하고 있으며 광역 논으로

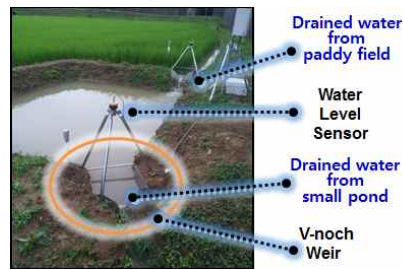
서 총 면적은 14.2 ha이다. 토양통은 석천통으로서 토성은 사양질 토양이다. 이천 시험포장에서의 관측기간은 2002년~2003년의 논벼 재배기간이며 관측방법은 Fig. 3.7과 같다. 초음파 수위계와 유속계를 이용하여 관개수로 유입부, 유출부의 유량을 관측함으로써 관개량을 산정하였으며 논 유출량은 Vee noch weir와 초음파 수위계를 이용하여 관측하였다. 유출수 수질은 현장에서 시료 채취 후 수질오염공정시험법에 의거하여 분석하였다.



(a) Water flow and monitoring place



(b) Irrigation water monitoring



(c) Paddy runoff monitoring

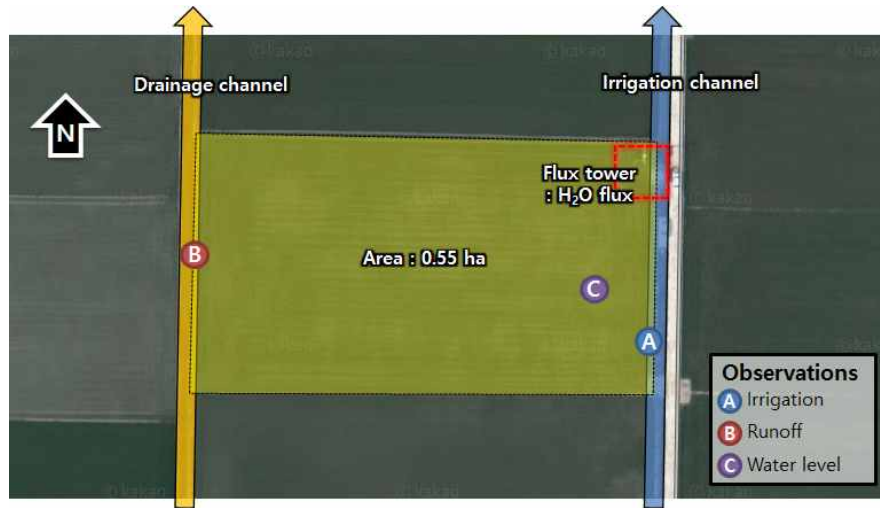
Fig. 3.7 Water budget monitoring systems in Icheon paddy site

김제 시험포장은 35°44'56.13"N, 126°51'50.21"E에 위치하고 있으며 0.5 ha의 단일필지이다. 토양통은 전복통으로서 토성은 실트질식양토이며 토양배수가 약간 불량하다 (류순호, 2001). 김제 시험포장에서의 관측기간은 2014년 5월~9월이며 물수지만을 측정하였다 (Fig. 3.8). AWS를 이용하여 10분 단위 기상자료를 수집하였으며 관개량과 배수량은 Vee noch weir와 초음파 수위계를 이용하여 측정하였고 논 수위 변화를 유전률식 수위계를 이용하여 측정하였다.

증발산량의 경우 플럭스 관측시스템을 이용하여 측정하였다. 측정기간은 2015년~2017년이다. 플럭스 관측시스템은 미기상학적 방법인 에디공분산법 (eddy covariance system)을 이용하여 벼논 생태계의 지표와 대기간에 교환되는 기체 (CO₂, H₂O)와 에너지 (현열, 잠열) 등의 물리량 흐름을 정량화한다 (Min *et al.*, 2013). 이중 대기 중의 기체이동은 CO₂/H₂O 가스분석기 (LI-7500, LI-COR Biosciences inc. USA)로 초당 10회 (10Hz)씩 측정하였고 30분 평균에 대한 편차를 공분산하여 30분 평균 물리량 플럭스를 계산하고 일 단위로 정리하였다. 기체 플럭스 계산식은 다음과 같다 (Min *et al.*, 2013).

$$F = \rho \overline{w'x'} \quad (3.5)$$

여기서 ρ 는 공기의 밀도 (kg/m³), $\overline{w'x'}$ 에서 $\overline{(\quad)}$ 는 시간평균을, w 는 연직풍속 (m/s)을, x 는 혼합비 (g m⁻³/kg m⁻³)를 prime ($'$)은 평균으로부터의 변동을 의미한다.



(a) Water flow and monitoring place



(b) Irrigation water monitoring



(c) Paddy runoff monitoring



(d) H₂O flux monitoring

Fig. 3.8 Water budget monitoring systems in Gimje paddy site

3.2.2 모형의 보정 및 검정 결과

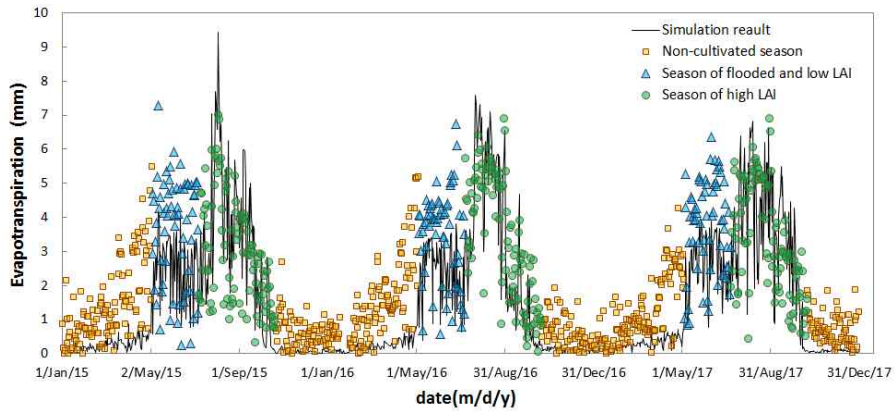
가. 증발산량 보 · 검정 결과

증발산량은 2개년 (2015, 2016)의 김제 플렉스 측정자료를 이용하여 보정하였으며 2017년 측정자료를 이용하여 검정하였다. APEX 모형 Penman-Monteith 공식의 매개변수인 P_1 , P_{12} , P_{17} 를 APEX 모형이 추천하는 범위 내에서 수동으로 조정하였으며 Hargreaves 공식의 경우 P_{23} 과 P_{34} 를 조정하였다. 모형의 보정 및 검정을 위한 목적함수로서 R^2 (결정계수, coefficient of determination)를 이용하였다. 보정에 사용된 매개변수의 정의와 보정 결과는 Table 3.3과 같다.

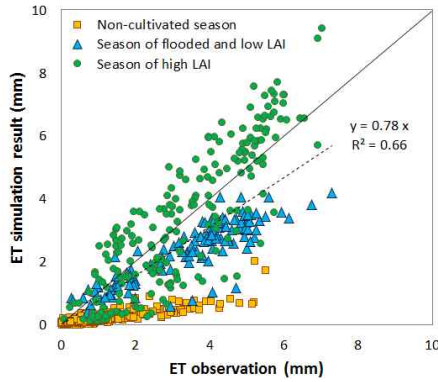
Table 3.3 Parameter calibration result for evapotranspiration

Parm.	Description	Before Cal.	After Cal.
P_1	Crop canopy-PET factor , used to adjust crop canopy resistance in the Penman-Monteith PET equation	2.0	1.0
P_{12}	Soil evaporation coefficient , governs rate of soil evaporation from top 0.2 m of soil	1.5	1.0
P_{17}	Soil evaporation - plant cover factor , Reduces effect of plant cover as related to LAI in regulating soil evaporation	0.1	0.0
P_{23}	Hargreaves PET equation coefficient	0.0023	0.0024
P_{34}	Hargreaves PET equation exponent	0.60	0.77
η	Water evaporation coefficient , used to adjust water evaporation while flooded condition	0.6	1.0

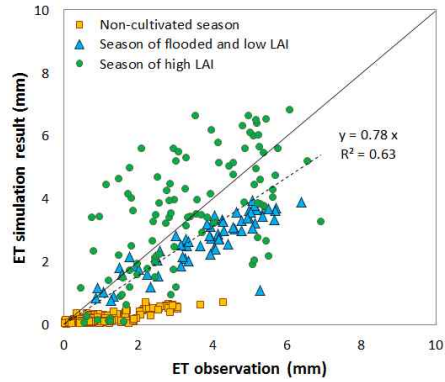
보정 전 모형의 초기설정 매개변수를 사용하였을 경우 관측자료와 모의자료의 분포는 Fig. 3.9와 같다. Fig. 3.9를 살펴보면 비영농기 토양증발량이 저평가되었음을 확인할 수 있다. 또한 담수가 시작됨에 따라 Eq. 3.2에 의하여 수면증발량이 적용되기 때문에 모의 값이 증가하는 경향을 보이거나 관측값에 비하여 여전히 낮은 값을 나타냈다.



(a) Simulation result before calibration



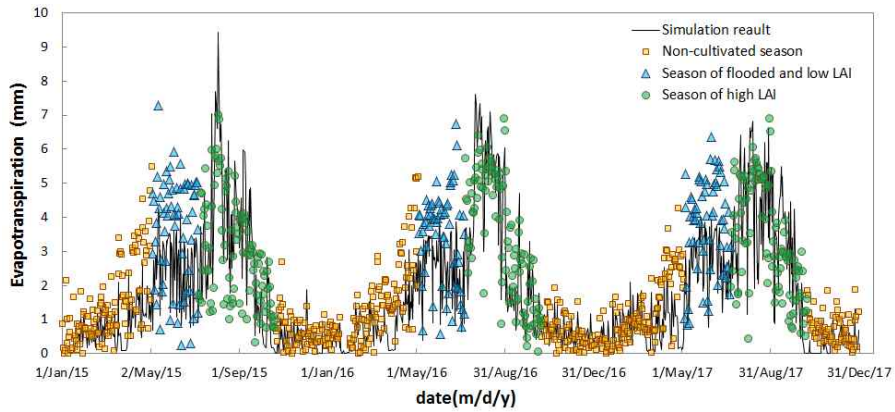
(b) Calibration period



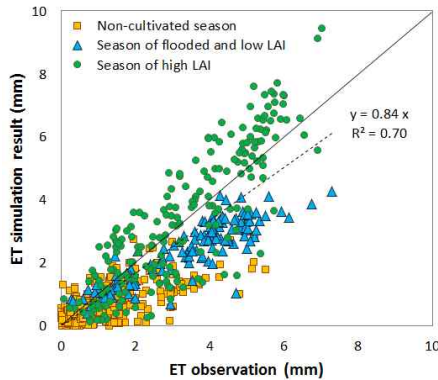
(c) Validation period

Fig. 3.9 Result of the comparison between the simulated value before calibration (use default parameter) and the observed value. ■: non-cultivated season, ▲: season of flooded and low LAI, and ●: season of high LAI groups are categorized

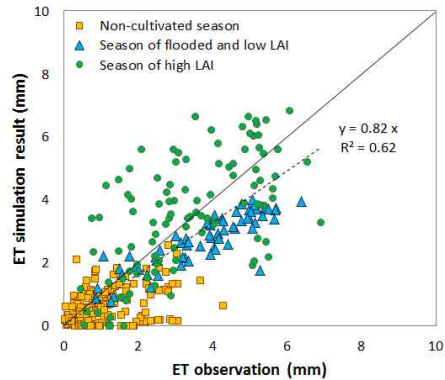
Fig. 3.10은 APEX 모형에서 보정 가능한 Penman-Monteith 공식의 입력 매개변수인 P_1 , P_{12} , P_{17} 를 보정한 결과이다. 특히 휴경기 토양 증발량을 높이기 위하여 토양증발을 제어하는 매개변수 값을 보정한 결과 논·휴경기 증발산량 모의결과를 증가시킴으로써 모형의 설명력을 제고할 수 있었다. 그러나 논에 담수를 시작하고 아직 벼 캐노피가 크지 않은 시기 (Fig. 3.10의 ▲)의 증발산량은 여전히 저평가 되었다.



(a) Simulation result after calibration (P_1 , P_{12} , P_{17})



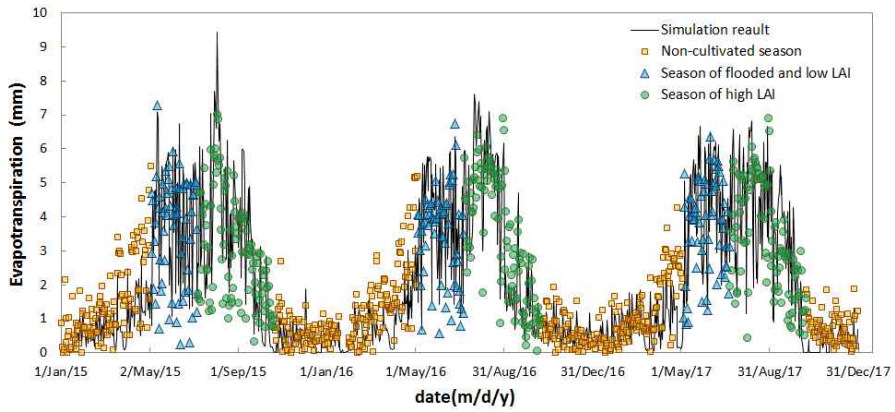
(b) Calibration period



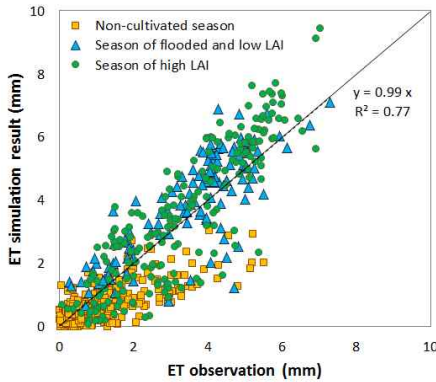
(c) Validation period

Fig. 3.10 Result of the comparison between the simulated value after calibration(P_1 , P_{12} , P_{17}) and the observed value

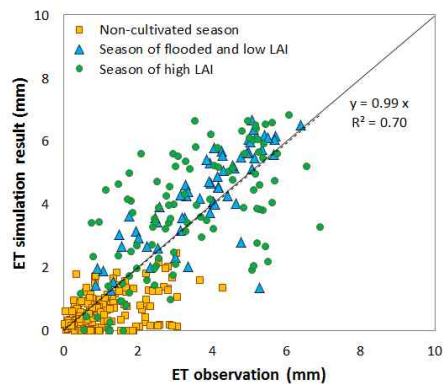
Eq. 3.2의 수면증발계수 η 의 초기 설정값 0.6은 본디 저수지 수면증발에 관한 값으로서 논 수면증발계수는 상당한 차이가 있을 것으로 판단된다. 논은 이앙 전부터 얕은 담수상태로 유지되는데 벼 캐노피가 낮은 시기에는 태양복사가 지면까지 도달하여 논물의 온도를 상당한 수준으로 상승시키기 때문이다. Fig. 3.11은 η 를 0.6에서 1.0으로 보정한 결과이다. 논 수면 증발량이 상당히 증가하는 것으로 나타났으며 보정기간의 R^2 는 0.77, 검정기간의 R^2 는 0.70으로 모의 정확도가 증가하였다.



(a) Simulation result after calibration (P_1 , P_{12} , P_{17} and η)



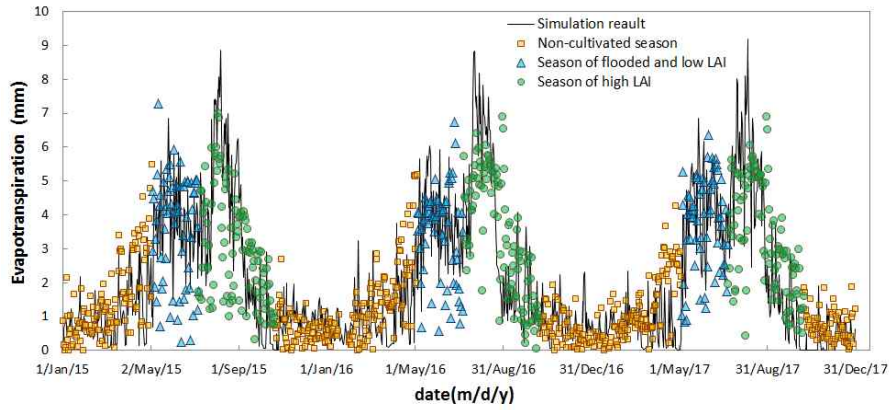
(b) Calibration period



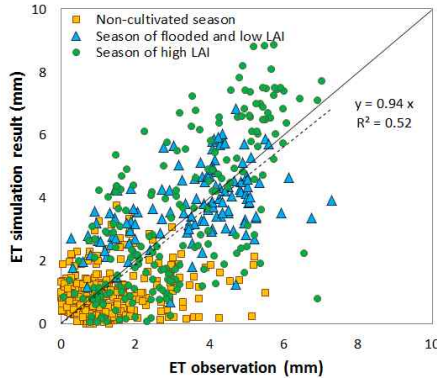
(c) Validation period

Fig. 3.11 Result of the comparison between the simulated and the observed value for paddy evapotranspiration using Penman-Monteith equation

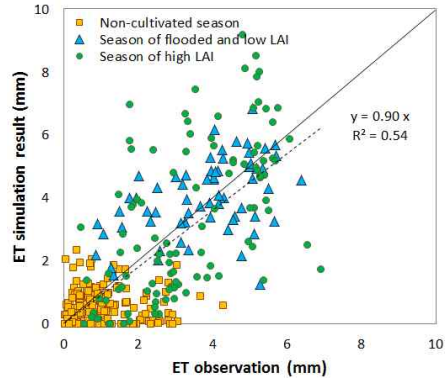
Hargreaves 공식에 의한 증발산량 추정 결과와 실측값을 비교하였다 (Fig. 3.12). η 를 1.0으로 설정한 상태에서 Hargreaves 공식의 매개변수인 P_{23} 과 P_{34} 를 보정한 결과 각각 0.0024, 0.77일 경우 보정기간에 대한 R^2 가 0.52, 검정기간에 대한 R^2 가 0.54로 가장 높았다. 그러나 Hargreaves 공식은 최고·최저기온만을 이용하여 증발산량을 산정하므로 Penman-Monteith 공식에 비하여 예측 신뢰도가 저조하였다.



(a) Simulation result after calibration



(b) Calibration period



(c) Validation period

Fig. 3.12 Result of the comparison between the simulated and the observed value for paddy evapotranspiration using Hargreaves equation

나. 유출량 및 질소 유출량 보·검정 결과

유출량 및 질소 유출량 보정에 대하여 APEX 모형의 자동 보정 프로그램인 APEX-CUTE (APEX-auto Calibration and Uncertainty Estimator) (Wang *et al.*, 2014)를 이용하였다. APEX-CUTE는 차원 변화탐색기법 (DDS, Dynamically Dimensioned Search)으로 모형의 매개변수를 보정한다 (Tolson *et al.*, 2007). 차원변화탐색기법을 이용한 모형 최적화 방법은 다음과 같다. APEX-CUTE는 목적함수의 최댓값이 도출될 때 까지 APEX모형과 연동하여 임의의 후보 해를 순차적으로 APEX 모형의 입력자료로 적용하면서 모형을 구동하고 모형의 실적통계를 계산한다. 이후 최적 해에 정규분포로 임의의 값을 추출하여 다른 후보 해를 생산하고 APEX 모형에 적용한다. 이와 같은 과정을 설정한 목적함수 검정 회수가 완료될 때 까지 반복한다.

본 연구에서는 이천 시험포장 유출구에서 관측한 유량 및 수질 자료를 바탕으로 APEX-Paddy 모형을 보·검정 하였으며 김제 유출구 유량자료는 모형의 검정에 이용하였다. 모형 보정을 위한 목적함수로서 R^2 를 사용하였으며 APEX-CUTE를 이용하여 매개변수를 10,000회 수정하면서 적정 매개변수를 찾았다.

유출량 및 질소유출량의 검정은 NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency), PBIAS (Percent Bias), R^2 를 이용하였다. NSE는 모형에 의해 모의한 결과가 관측값의 평균값을 사용하는 것에 비하여 얼마나 설명력을 갖는지를 평가하는 개념으로서 0.0~1.0의 값을 갖는다 (Nash and Sutcliffe, 1970). 1.0에 가까울수록 모형의 모의결과가 관측 결과를 잘 반영하는 것으로 평가되며 0 이하의 값이면 모형을 사용하는 것 보다 관측의 평균값을 사용하는 것이 유리함을 의미한다

(Santhi *et al.*, 2001). NSE는 다음과 같이 산정된다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \quad (3.6)$$

여기서, Y_i^{obs} 와 Y_i^{sim} 는 각각 관측시간 i 에 대한 관측값과 모의값이며 Y^{mean} 은 관측값의 산술평균값이다. 그리고 n 은 전체 관측수이다 (Moriasi *et al.*, 2007).

PBIAS는 모의값과 실측값 총합의 대소를 비교하는 지표이다. PBIAS의 최적값은 0.0으로서 PBIAS의 절댓값이 낮을수록 모의 값이 실측값을 잘 반영하는 것으로 판단할 수 있다. 양의 값은 모형이 과소추정을, 음의 값은 모형이 과대추정을 하는 것을 의미한다. PBIAS는 다음과 같이 산정된다.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})}{\sum_{i=1}^n Y_i^{obs}} \times 100\% \quad (3.7)$$

모형의 평가기준은 Table 3.4과 같이 Moriasi *et al.* (2015)의 유역 모형 평가기준을 따랐다.

Table 3.4 General performance rating for recommended statistics (Moriassi *et al.*, 2015)

OF ^a	Output response	Performance evaluation criteria			
		Very good	Good	Satisfactory	Not satisfactory
R ²	Flow ^b	R ² > 0.85	0.75 < R ² ≤ 0.85	0.60 < R ² ≤ 0.75	R ² ≤ 0.60
	N	R ² > 0.80	0.60 < R ² ≤ 0.70	0.30 < R ² ≤ 0.60	R ² ≤ 0.30
NSE	Flow	NSE > 0.80	0.70 < NSE ≤ 0.80	0.50 < NSE ≤ 0.70	NSE ≤ 0.50
	N/P	NSE > 0.65	0.50 < NSE ≤ 0.65	0.35 < NSE ≤ 0.50	NSE ≤ 0.35
PBIAS	Flow	PBIAS ≤ ±5	±5 < PBIAS ≤ ±10	±10 < PBIAS ≤ ±15	PBIAS ≥ ±15
	N/P	PBIAS ≤ ±10	±10 < PBIAS ≤ ±20	±20 < PBIAS ≤ ±30	PBIAS ≥ ±30

^aObjective Function

^bIncludes stream flow, surface runoff, and base flow for watershed- and field-scale models.

Fig. 3.13은 APEX-Paddy 모형의 보·검정 결과이다. 보정기간 (2002년 5월~9월)에 대하여 모형은 관측결과를 잘 반영하는 것으로 나타났다 ($R^2 = 0.88$, $NSE = 0.87$, $PBIAS = -14.57\%$). 검정기간 (2003년 5월~9월)에 대하여도 모의결과가 관측결과를 잘 반영하는 것으로 나타났다 ($R^2 = 0.80$, $NSE = 0.65$, $PBIAS = 9.6\%$).

Fig. 3.14는 김제 시험포장을 대상으로 관측기간 (2014년 5월~9월)의 논 배수량 관측값을 이용하여 모형을 검정한 결과이다. $R^2 = 0.77$, $NSE = 0.70$, $PBIAS = 10.82\%$ 로 모의결과가 관측결과를 잘 반영하는 것으로 나타났다. 모형은 물꼬를 설치, 제거 (낙수)하거나 물높이를 낮추는 (이양 전 물꼬 조절) 등의 물관리에 따른 배수량을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 5월 24일의 모내기를 위한 배수를 잘 모의하였으며 7월 9일의 중간낙수, 10월 1일의 수확 전 낙수에 따른 배수량을 반영하고 있다. 그리고 8월 7일에는 58.6 mm의 많은 비가 내렸음에도 유출이 발생하지 않았는데 이는 8월 5일 중간낙수를 마치고 다시 물꼬를 설치하였기 때문이다. 모형의 모의 결과도 이러한 현상을 잘 반영하고 있다.

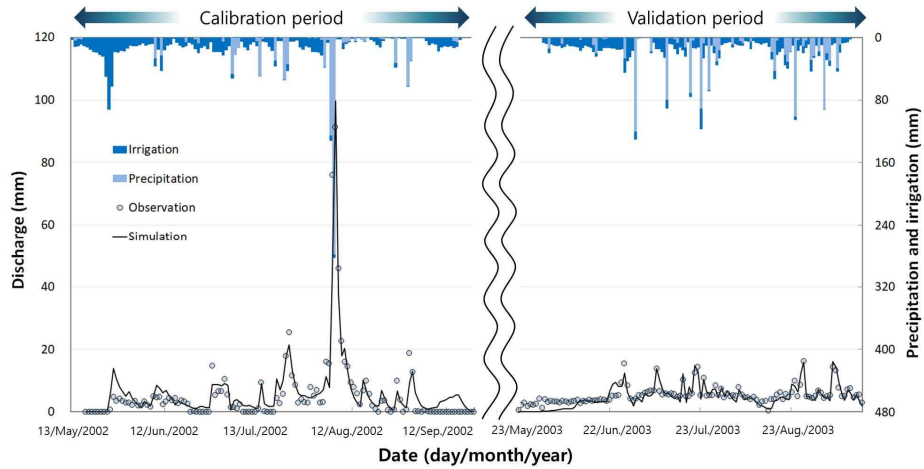


Fig. 3.13 Predicted daily paddy field discharges are calibrated for the growing season in 2002, and then validated for the year 2003 at the Icheon site

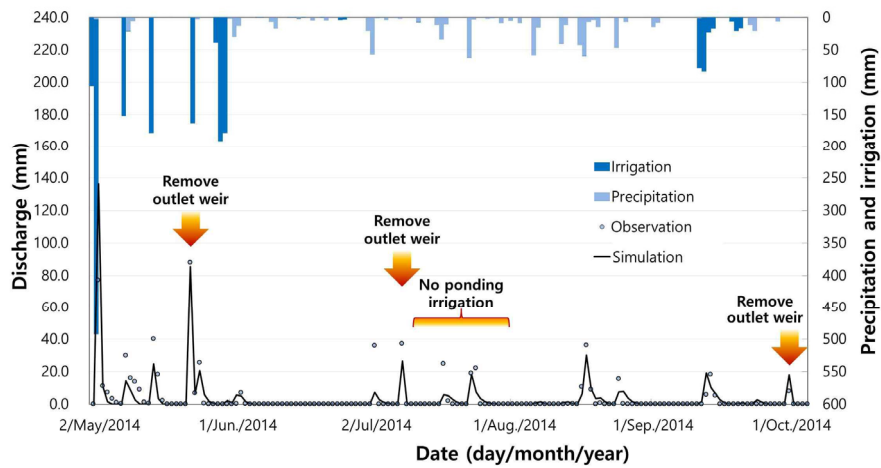


Fig. 3.14 Simulated discharge amounts indicate that the timing and magnitude of peak discharges in response to outlet weir management are well predicted during the growing season in 2014 at the Gimje site

이천 시험포장에는 2002년 96.8 kg/ha의 질소가 투입되었으며 2003년에는 100.0 kg/ha의 질소가 투입되었다. Fig. 3.20의 관측자료를 살펴보면 질산태 질소 ($\text{NO}_3\text{-N}$)와 암모늄태 질소 ($\text{NH}_4\text{-N}$)의 합계인 무기태 질소의 유출량은 시비량과 시비 시기, 유출량과 연관이 큰 것을 확인할 수 있다.

APEX-Paddy 모형의 QN (무기태 질소유출량 출력인자) 결과는 관측 결과를 어느 정도 반영하는 것으로 나타났다. 보정기간에 대하여 R^2 는 0.66, NSE는 0.63, PBIAS는 2.1%이며 검정기간에 대하여 R^2 는 0.64, NSE는 0.43, PBIAS는 4.5%로 산정되었다. Moriasi *et al.* (2015)의 기준 (Table 3.3)에 따르면 모형의 결과가 만족 (satisfy) 수준인 것으로 평가된다.

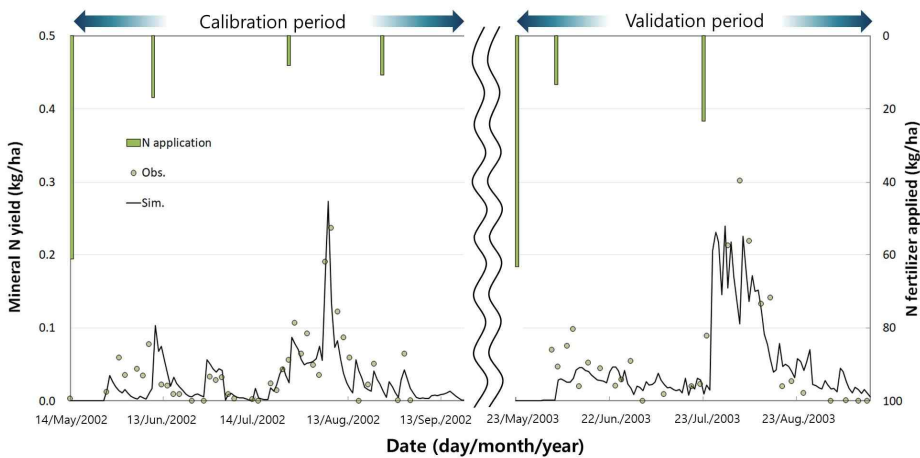


Fig. 3.15 Daily QN predicted by APEX-Paddy is calibrated for the growing season in 2002 and then validated in 2003 at the Icheon site

다. APEX 모형과 APEX-Paddy 모형의 비교

SCS-CN 방법에 의해 유출을 모의하는 기존의 APEX 모형과 논 모형을 추가한 APEX-Paddy 모형을 비교평가 하였다. APEX 모형의 보정을 위하여 APEX-Paddy 모형과 마찬가지로 이천 지역의 2002년 관측결과를 이용하였으며 R^2 를 목적함수로, 유출량 (Q)과 QN에 대하여 APEX-CUTE를 이용하여 10,000회 반복을 통해 최적 매개변수를 산정하였다. 그 결과 R^2 는 0.57, NSE는 -1.91, PBIAS는 -80.9% 수준으로 보정되었다 (Fig. 3.16). 음의 NSE 값은 유출량 추정에 있어 모형을 이용하는 것 보다 관측값의 평균을 사용하는 것이 합리적임을 의미한다. 또한 -80.9%의 PBIAS는 모의 값이 관측값보다 월등히 과다산정 하였음을 의미한다. R^2 , NSE, PBIAS는 Moriasi *et al.* (2015)의 기준에 따라 불만족 (unsatisfactory) 수준으로 평가되었다. 논 유출량에 대한 APEX 모형과 APEX-Paddy 모형의 비교 결과는 Table 3.5에 정리하였다.

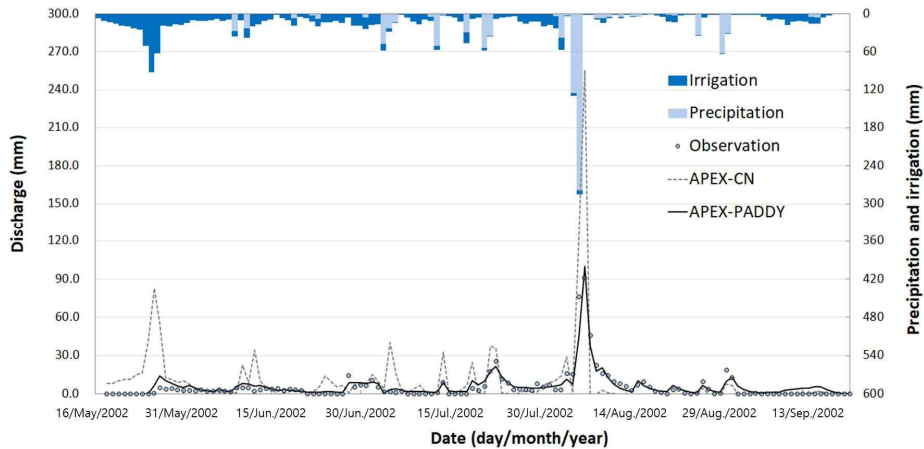


Fig. 3.16 Comparison between APEX and APEX-Paddy model results for runoff

Table 3.5 Summary of calibration and validation results for daily runoff at the study site

Item	Location	Period	No. of measure (day)	Rainfall (mm)	Irrigation (mm)	Discharge (mm)		R ²	NSE	PBIAS (%)
						Obs.	Sim.			
APEX										
Cal.	Icheon	2002	127	882.0	1291.8 ^a	670.4	1222.0	0.57	-1.91	-80.9
								(not	(not	(not
								satisfactory)	satisfactory)	satisfactory)
APEX-Paddy										
Cal.	Icheon	2002	127	882.0	1291.8	670.4	733.8	0.88	0.87	-14.6
								(very good)	(very good)	(satisfactory)
								0.80	0.65	9.6
								(good)	(satisfactory)	(good)
Val.								0.77	0.70	10.8
	Gimje	2014	156	737.8	887.0	606.8	568.8	(good)	(good)	(satisfactory)

^aThe amount of irrigation was measured significantly large due to continuous irrigation.

Fig. 3.17은 일 QN에 대한 비교 결과이다. APEX 모형의 유출량 모의가 만족스럽지 못한 결과를 보임에 따라 물을 따라 이동하는 무기태 질소에 대한 모의 결과도 관측결과와 큰 차이를 보였다. 무기태 질소 유출에 대한 APEX 모형과 APEX-Paddy 모형의 결과는 Table 3.6에 정리하였다.

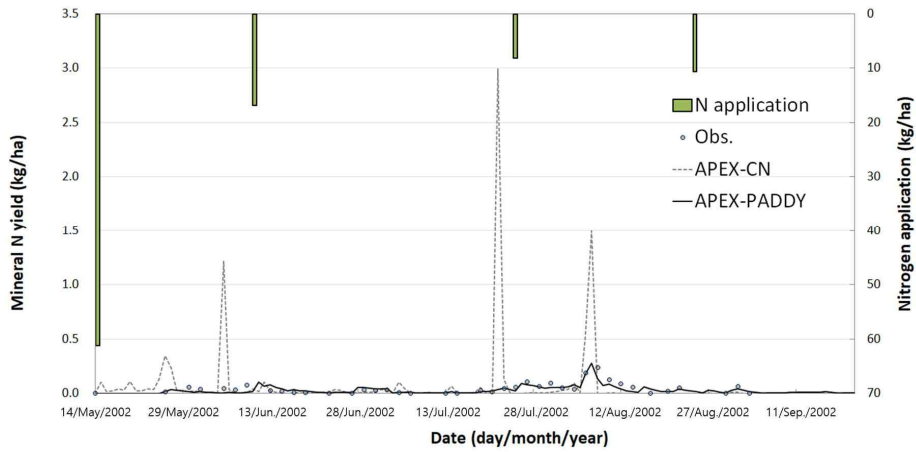


Fig. 3.17 Comparison between APEX and APEX-Paddy model results for mineral nitrogen yield

Table 3.6 Mineral nitrogen loads in paddy discharge (QN) estimated by Paddy module compared with the SCS-CN method at the Icheon site

Class	Year	#Measures	Obs.	Sim.	R^2	NSE	PBIAS (%)
			load ^a (kg/ha)	load (kg/ha)			
APEX	2002	39	1.76	2.68	0.02	-14.4	-52.9
APEX	2002	39	1.76	1.39	0.66	0.68	2.1
-Paddy	2003	27	1.31	1.17	0.64	0.43	4.5

^aSum of mineral nitrogen yield at the measured date.

제 4 장 APEX-Paddy 모형의 적용

4.1 대상지역

기후변화 영향평가 대상지역은 인근 종관기상관측소가 GCMs의 기준인 1976~2005년 기간에 대한 최고·최저기온 ($^{\circ}\text{C}$), 일사량 (MJ/m^2), 강수량 (mm), 상대습도 (%), 평균풍속 (m/s) 자료를 보유하고 있는지, 자료의 신뢰도가 충분한지, 해당 지역의 객관적인 논벼 재배관련 자료를 확보할 수 있는지를 고려하여 결정하였다. 1976~2005년 기간의 자료를 보유한 측후소는 60개 지역이며 해당 측후소들은 전 기간의 일조시간 (hr)자료를 보유하고 있으나 일사량 자료를 보유한 측후소는 이들 중 9개 지역에 불과하다. 일사량 자료를 보유한 측후소 중에서 원주, 안동 측후소와 같이 관측기간 중 최대 일 일사량이 $69.34 \text{ MJ}/\text{m}^2$ 로 외기복사량을 상회하는 자료를 보유하고 있는 지역은 신뢰도가 떨어지므로 연구대상 지역에서 제외하였다. 이에 따라 춘천, 강릉, 서울, 인천, 수원, 청주, 목포, 진주 8 지역을 1차 연구대상 후보지역으로 선정하였다. 또한 서산, 전주, 추풍령, 대구, 포항, 광주, 부산 지역은 1981년부터 모든 기후인자에 대한 정보를 보유하고 있고 일사량 관측자료에 대한 신뢰도 있는 자료를 보유하고 있어 2차 연구대상 후보지역으로 결정하였다 (Fig. 4.1).

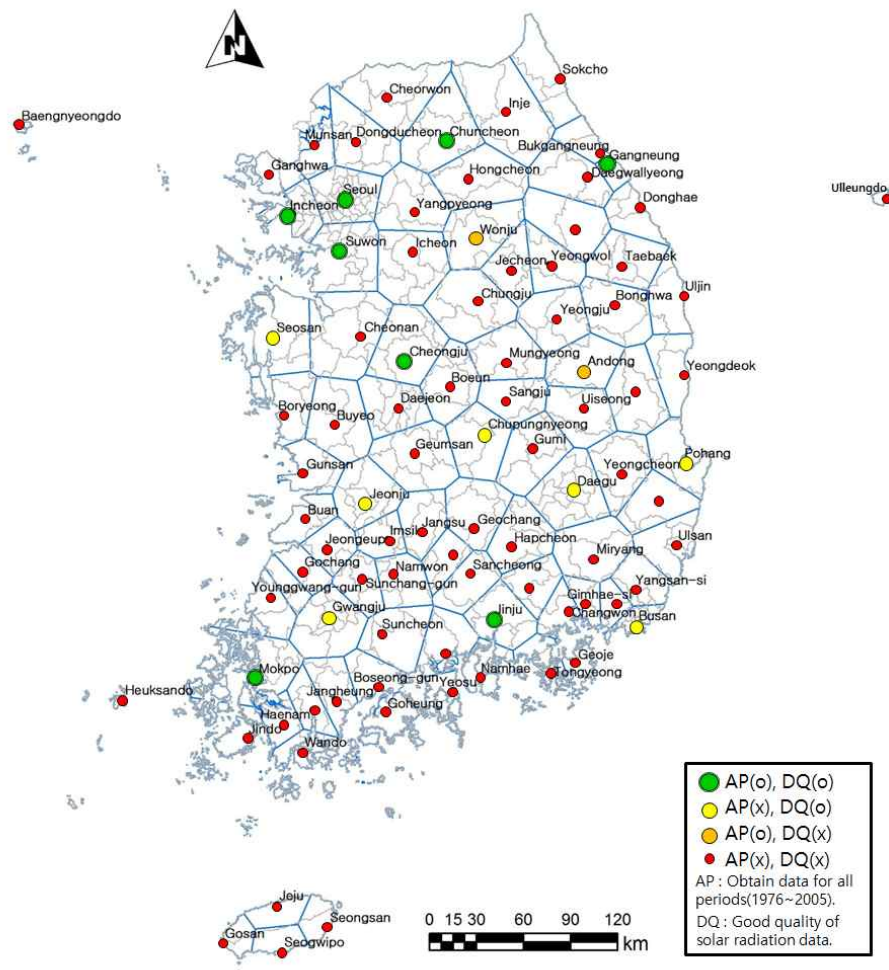


Fig. 4.1 Status of meteorological station

모형을 활용하여 실제 현상을 모의하기 위해서는 현실적이고 객관적인 입력자료 구축이 중요하다. APEX-Paddy 모형은 벼 재배 시벼의 생장과 생육을 고려한 경운, 시비, 물관리, 수확 등에 대한 자세한 입력 자료를 요구한다. 따라서 연구대상지역의 선정에 있어 객관적인 입력자료를 확보 할 수 있는지를 고려하였다. 농촌진흥청(2009)의 작황시험보고서는 국립식량과학원 본원의 6개 재배시험지와 8개 도 농업기술원의 11개 재배시험지에 대하여 파종, 이앙, 출수기에 대한 정보와 수량구성요소 및 수량 정보를 제공하고 있다. 이를 고려하여 시험지가 있는 지점을 연구대상 후보지역으로 선정하였다.

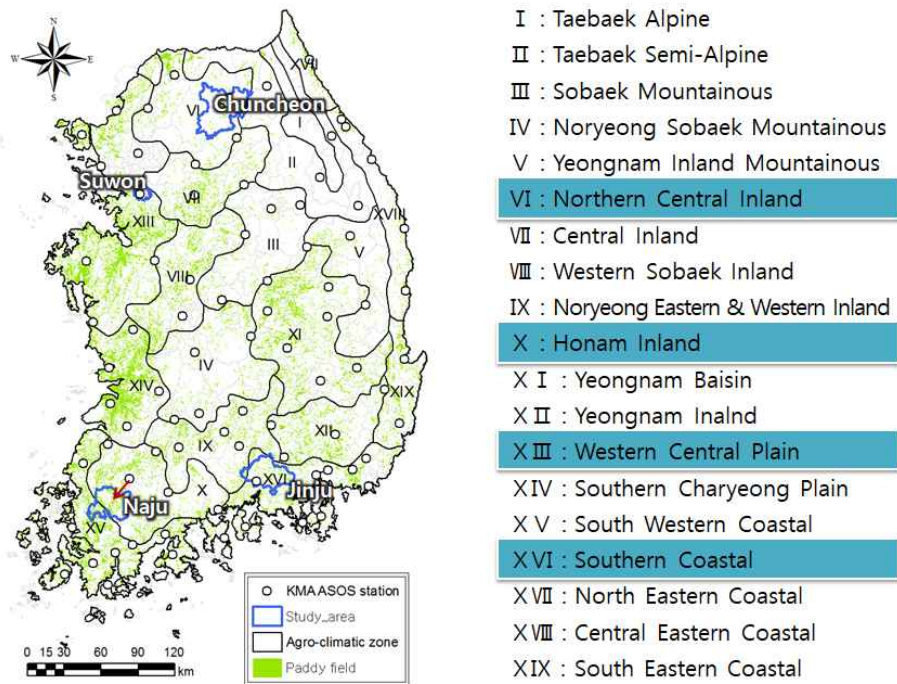


Fig. 4.2 Study areas Chuncheon, Suwon, Naju, and Jinju were selected considering quantity and quality of climate data, rice growth data, and agro-climatic zone

최종적으로 기상정보, 벼 생육 정보, 기후대 구분을 고려하여 연구 대상지역을 선정하였다 (Fig. 4.2). 기후변화 영향평가 연구의 대상 지역은 춘천, 수원, 나주 (광주 기상관측소), 진주이다. 나주의 경우는 기후변화 영향평가의 기준인 과거기간 (Historical period)을 기후 인자가 모두 갖추어진 1981년~2005년으로 한정하였다. 다른 지역은 GCMs의 기준인 1976년~2005년의 기후자료를 사용하였다.

대상지역의 농 작업 일정은 시험포장을 대상으로 작성한 작황시험 보고서 (농촌진흥청, 2008)와 국립식량과학원의 자문, 농촌진흥청 및 국립식량과학원, 국립농업과학원의 연구보고서 (농촌진흥청, 2006; 국립식량과학원, 2009; 국립농업과학원, 2010)를 통해 작성하였다. 작황시험보고서에는 출수기에 대한 정보만 제공되므로 Park (2008)에 따라 출수기로부터 적산온도 1100℃가 되는 시기를 완숙기로 판단하였다 (Fig. 4.3). 또한 연간 기상의 변동을 고려하여 수확기를 완숙기 10일 후로 결정하였다.

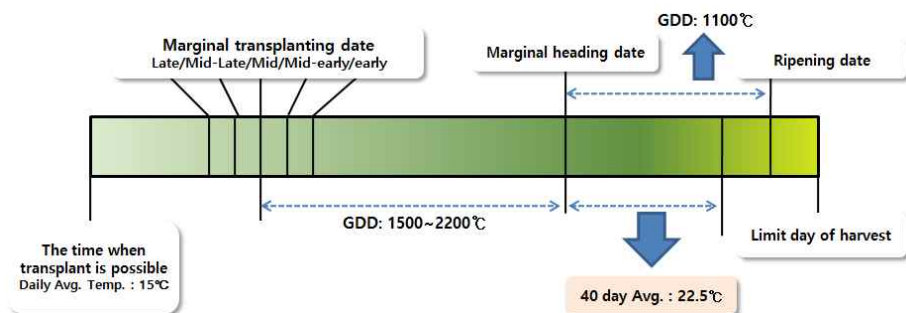


Fig. 4.3 Growth period of paddy rice. The full ripe period is when the cumulative temperature reaches 1100 degree from the heading date

Table 4.1 Paddy management schedule of study areas

No.	Management	Chun cheon	Suwon	Naju	Jinju
1	Pesticide application	5.10	5.17	5.22	5.22
2	Tillage operation, 30 cm depth	5.10	5.17	5.22	5.22
3	Set outlet weir height as 100mm	5.11	5.18	5.23	5.23
4	Irrigation for 100mm ponding	5.11	5.18	5.23	5.23
5	Fertilizer N, P and K application	5.21	5.28	6.1	6.1
6	Puddle operation, 30 cm depth	5.21	5.28	6.1	6.1
7	Set outlet weir height as 25mm	5.24	5.31	6.4	6.4
8	Irrigation for 20mm ponding	5.24	5.31	6.4	6.4
9	Transplanting	5.25	6.1	6.5	6.5
10	Set outlet weir height as 60mm	6.1	6.8	6.12	6.12
11	Irrigation for 55mm ponding	6.1	6.8	6.12	6.12
12	Pesticide application	6.2	6.9	6.13	6.13
13	Fertilizer N application	6.9	6.16	6.20	6.20
14	Stop Irrigation	6.30	7.6	7.6	7.3
15	Remove outlet weir	7.5	7.11	7.11	7.8
16	Fertilizer N and K application	7.15	7.21	7.21	7.18
17	Set outlet weir height as 80mm	7.20	7.26	7.26	7.23
18	Irrigation for 70mm ponding	7.20	7.26	7.26	7.23
21	Stop Irrigation	9.13	9.19	9.19	9.16
22	Remove outlet weir	9.18	9.24	9.24	9.21
23	Harvest	10.3	10.10	10.7	10.3
24	Rice stark application	10.4	10.11	10.8	10.4

APEX-Paddy 모형에 적용된 농 작업 일정은 Table. 4.1과 같다.

시비량과 시비 시기의 결정 근거는 다음과 같다. 고품질 쌀 생산을 위한 추천 시비량은 질소-인-칼륨, 9-4.5-5.7 kg/10a 이다 (국립식량과학원, 2009). 기비 (이앙 전 시비)는 전층시비하며 논 관개 3~4일 전에 투입하여 흙과 잘 섞이도록 한다 (농촌진흥청, 2006). 질소는 기비 전체 시비량의 50%, 분얼비로 20%, 이삭비로 30%를 시비한다. 인은 기비로 100% 시비하며 칼륨은 기비로 70%, 이삭비로 30%를 시비한다 (국립농업과학원, 2010). 분얼비는 벼의 활발한 분얼을 촉진하기 위하여 이앙 15일 후에 표층시비 하며, 이삭비는 출수 25일 전에 시비하는 것이 가장 효율이 좋다 (전라남도농업기술원, 2010).

논 물 관리 방법과 시기의 결정 근거는 다음과 같다. 벼는 주로 답수상태로 재배되나 생육시기에 따라 깊게 또는 얇게 관개하거나 배수를 해 주어야 생장 저해가 오지 않는다. 벼는 생육시기에 따라 필요로 하는 물의 양이 다른데 수잉기에 가장 많은 물을 필요로 하고 다음은 활착기와 유수발육전기, 그 다음은 출수개화기이며, 유효분얼기와 등숙기에는 적은 양의 관개가 필요하다. 반면에 생육중기인 무효분얼기에는 관개할 필요가 없다 (농촌진흥청, 2006). 중간낙수의 시작은 출수 전 40일~30일 사이에 하는 것이 일반적이며 배수가 좋은 사양토에서는 5~7일간 실금이 생길 정도로, 배수가 불량한 점질토에서는 7~10일간 토양에 강한 금이 생길 정도로 낙수를 하는 것이 좋다. 너무 빨리 중간낙수를 할 경우 질소 휘산으로 인하여 질소 이용률이 떨어지고 잡초발생이 많아지며, 너무 늦게 중간낙수를 할 경우 무효분얼이 많아 벼가 연약하고 생육이 불균일하여 쌀 생산성과 품질을 저하될 우려가 있다 (농촌진흥청, 2006). 낙수는 기상,

토성 등에 따라 다르나 벼가 충분히 여물게 하기 위하여 이삭판 후 30~40일경에 낙수하는 것이 유리하다. 콤바인 등 수확장비의 사용이 수월하기 위하여 낙수를 지나치게 빨리하면 사미, 청미 등의 불완전미가 증가하여 수량과 품질이 저하된다 (농촌진흥청, 2006).

수확 후 잔사는 수거하여 조사료로 사용되기도 하나 토양 유기물 유지를 통한 수확량 확보를 위해 주기적으로 잔사를 환원하거나 퇴비를 시용하여야 한다. 본 연구에서는 토양 유기물 21~30 kg/ha를 유지하기 위해 연간 6 ton/ha의 볏짚을 환원하는 것으로 가정하였다. 볏짚의 톤 당 성분함량은 질소, 인, 칼륨 각각 1 kg, 1 kg, 4 kg 이다 (국립농업과학원, 2017).

4.2 기후변화 시나리오 및 재현성 평가

4.2.1 기후변화 시나리오의 상세화

가. RCP 시나리오

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)는 5차 보고서에서 대표농도경로 (RCP: Representative Concentration Pathway) 시나리오를 기후변화시나리오로 채택하였다. RCP는 CO₂ 농도변화에 따라 21세기말 (2100년) 복사강제력이 4.5 W/m²이면 RCP4.5 시나리오, 8.5 W/m²이면 RCP8.5 시나리오로 분류된다. IPCC는 RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 시나리오를 제시하고 있으나 본 연구에서는 RCP4.5 시나리오와 RCP8.5 시나리오를 대상으로 기후변화 영향평가를 수행하였다. RCP8.5 시나리오는 현재와 같이 온실가스를 배출할 경우의 시나리오이며, RCP4.5 시나리오는 온실가스 배출을 줄이려는 노력이 상당히 실현된 미래의 시나리오이다 (IPCC, 2014). IPCC 5차보고서의 RCP 시나리오 별 대기 중 CO₂ 농도의 변화는 Fig. 4.4와 같다. CO₂농도 값은 FAO AquaCrop 모형의 RCP 시나리오별 CO₂농도 데이터베이스로부터 추출하였다.

APEX1501 모형과 APEX-Paddy 모형은 기후 데이터베이스 (DLY 파일)에 CO₂ 농도를 부가적으로 요구하고 있으나 모형구동시 입력 값이 결과에 영향을 주지 않았다. 그러나 모형 구동제어 파일 (APEXCONT.DAT)의 CO₂농도 입력값은 증산량, 바이오매스 증가량에 영향을 주었다. 따라서 APEX-Paddy 모형의 입력 자료로서 CO₂ 농도는 각 분석기간의 평균값을 적용하였다. APEX-Paddy 모형에 적용된 분석기간 별 CO₂ 농도는 Table 4.2와 같다.

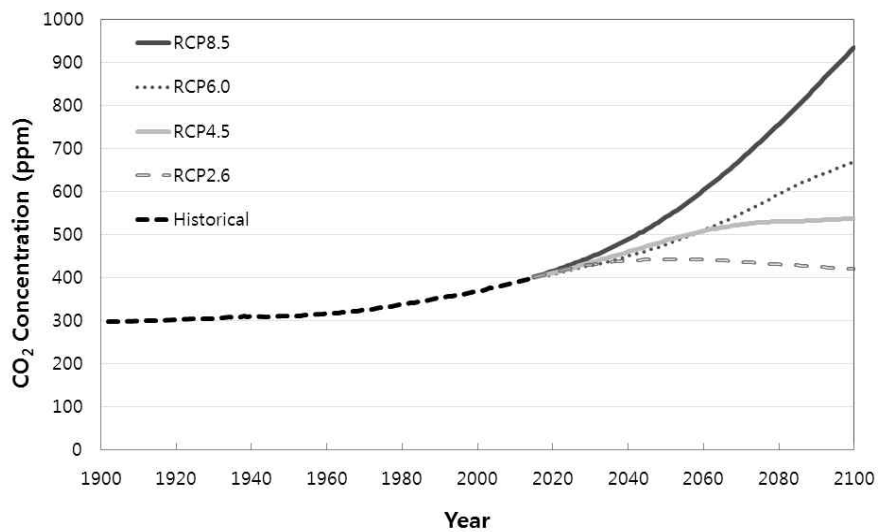


Fig. 4.4 CO₂ concentration curve for each RCP scenario
(Choi *et al.*, 2017b)

Table 4.2 CO₂ concentration value applied to APEX-Paddy model by analysis periods (Choi *et al.*, 2017b)

Periods	1976~2005	2011~2040	2041~2070	2071~2100
Scenario	(Hist.)	(2025s)	(2055s)	(2085s)
RCP 4.5	363.09	424.88	497.47	532.43
RCP 8.5	363.09	435.65	578.07	807.17

(unit : ppm)

나. 전지구기후모형

본 연구는 IPCC 제5차 평가보고서에서 사용한 RCP 시나리오로서 RCP 4.5, RCP 8.5 시나리오를 적용하였다. GCM 자료는 CMIP5를 통해 제공되며 이중 9종의 GCM이 RCP 4.5, 8.5 시나리오를 대상으로 우리나라의 최고·최저기온, 일사량, 강수량, 상대습도, 평균풍속 자료를 2100년 까지 모두 보유하고 있다. HadGEM2-ES GCM의 경우는 2092년까지의 자료만을 보유하고 있어 분석에서 제외하였다. 본 연구에 사용된 GCM들의 특성은 Table 4.3과 같다.

Table 4.3 Characteristics of the GCMs in CMIP5 data analyzed in this study (Cho *et al.*, 2015)

Model acronym	Modeling system/Country	Institute	Spatial resolution (pixels) (Lon.×Lat.)
bcc-csm1-1	Beijing Climate Center climate system model based on NCAR CCSM2.0.1, China	CMA	128 × 128
CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada	CCCMA	128 × 64
GFDL-ESM2G	GFDL Earth System Model with Generalized Ocean Layer Dynamics (GOLD) component (ESM2G), USA	GFDL	144 × 90
GFDL-ESM2M	GFDL Earth System Model with Modular Ocean Model 4 (MOM4) component (ESM2M), USA	GFDL	144 × 90
HadGEM2-CC	Hadley Centre Global Environment Model, version 2-Earth System; Met Office, United Kingdom	MOHC	192 × 145
inmcm4	Institute of Numerical Mathematics (INM) Coupled Model, Russia	INM	180 × 120
IPSL-CM5A-LR	L'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) Coupled Model, coupled with NEMO, low resolution; France	IPSL	96 × 96
MIROC-ESM	Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan	MIROC	128 × 64
MIROC-ESM-CHEM	Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan	MIROC	128 × 64

다. 기후변화 시나리오의 통계적 상세화

농업연구를 위한 모형은 일반적으로 일 단위 자료를 요구하는데 반하여 대부분의 기후변화 시나리오는 월 단위 자료로 제공된다. 또한 기후와 GCM에 계통오차 (Systematic Bias)가 있기 때문에 통계적 방법에 의한 시·공간적 상세화와 편의보정 (Bias Correction)과정이 필요하다 (Chung *et al.*, 2015).

본 연구에서는 APEC 기후센터에서 제공하는 AIMS (APCC Integrated Modeling Solution) 프로그램을 이용하여 비모수적 분위사상법 (Non-Parametric Quantile Mapping)에 의한 GCM 편의보정을 수행하였다. 비모수적 분위사상법은 (Fig. 4.5) 과거기간에 대한 GCM 모의 결과의 계통오차를 동일 기간의 관측 자료의 분포와 비교하는 방법으로서 확률분포함수 없이 모의 및 관측 자료의 실제 분포를 직접 사용한다 (Cho *et al.*, 2015). 관측 자료는 연구대상지역의 종관기상관측소 (ASOS, Automated Synoptic Observing System)의 자료를 이용하였다.

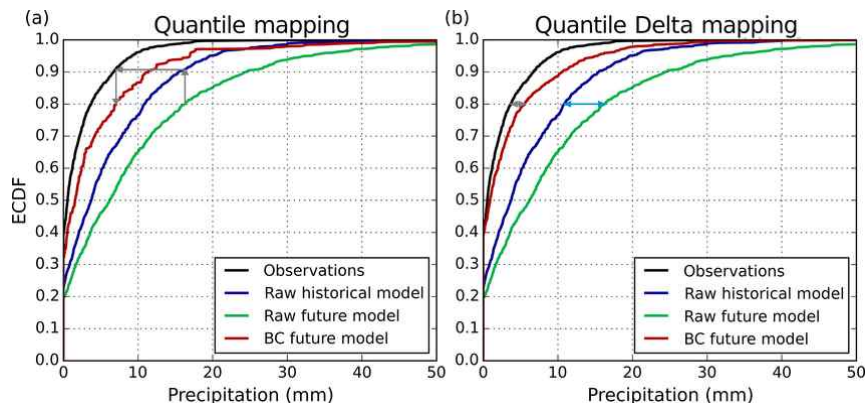


Fig. 4.5 Schematic of the quantile mapping versus quantile delta mapping methodologies (Switanek *et al.*, 2017)

4.2.2 기후변화 시나리오의 재현성 및 불확실성 평가

기상관측소의 관측 자료 통해 산정한 증발산량 결과와 기후변화 시나리오의 과거 관측기간 (Historical, 1976~2005)에 대한 재현자료가 용인할 수 없는 수준의 차이를 보인다면, 기후변화시나리오에 의한 미래 증발산량 예측 결과도 신뢰하기 어렵다. 또한 GCM의 미래 기후 예측 결과는 많은 불확실성을 내포하고 있어 각각의 GCM마다 예측 결과가 상이할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기후변화 영향평가에 앞서 기후 예측의 재현성 (Reproducibility)과 불확실성을 평가하였다. 평가 항목은 연평균 기온, 연평균 일사량, 연 강수량, 연평균 상대습도, 연평균 풍속이다.

재현성 평가의 기준년도는 관측기간인 1976~2005년이며 일부 결측값은 30년 월 평균값으로 대체하였다. 재현성 평가 방법으로 재현기간에 대하여 각 기후인자의 1위~30위 순위 값을 비교하였으며 평균, 사분위 범위, 본페로니 (Bonferroni) 방법에 의한 최소유의차 검정 (Least Significant Difference test, LSD test)을 사용하여 과거 관측자료와 재현자료가 유의한 차이가 있는지 평가하였다.

불확실성 평가는 미래 기간을 2011년~2040년 기간을 2025s, 2041년~2070년 기간을 2055s, 2071년~2100년 기간을 2085s로 30년 단위로 구분하였으며 해당 기간의 GCM 별 기후 예측 결과의 평균 및 사분위 범위를 비교하였다. 불확실성 평가는 수원지역으로 제한하였다.

재현기간에 대한 기후인자 별 순위 값을 비교한 결과 연평균 기온, 연 강수량은 재현값과 실측값 분포가 대체로 일치하는 것으로 나타났으나 (Fig.4.6~4.7) 연평균 일사량, 상대습도, 풍속의 경우 관측값의 범위에 비하여 재현값의 분포 범위가 매우 좁은 것으로 나

타났다 (Fig.4.8~4.10).

일사량의 관측값 분포 범위가 수원, 춘천, 진주 지역에서 넓게 나타난 원인은 특이값 때문인 것으로 판단된다. 수원의 경우 1985년도의 기온, 풍속, 상대습도는 평년과 유사한 값을 보였으나 평균 일사량이 8.19 MJ/m^2 로 평년 11.99 MJ/m^2 에 비해 매우 낮게 측정되었다 (Fig. 4.8(a)). 같은 시기 인접한 서울, 인천 측후소의 연 평균 일사량은 각각 12.47 MJ/m^2 , 10.59 MJ/m^2 로 같은 기간 측후소 간에도 측정값의 차가 매우 큰 것으로 나타났다. 이러한 차이를 측정오차로 단정할 근거는 부족하나 해당 연도의 일사량이 일관적으로 낮은 값을 보이는 점, 동일한 기간의 인접 측후소와 비교하여 일사량이 매우 낮은 점을 고려할 때 기후변화 영향평가 시 일사량 관측 자료의 신뢰도를 염두에 두어야 할 것이다.

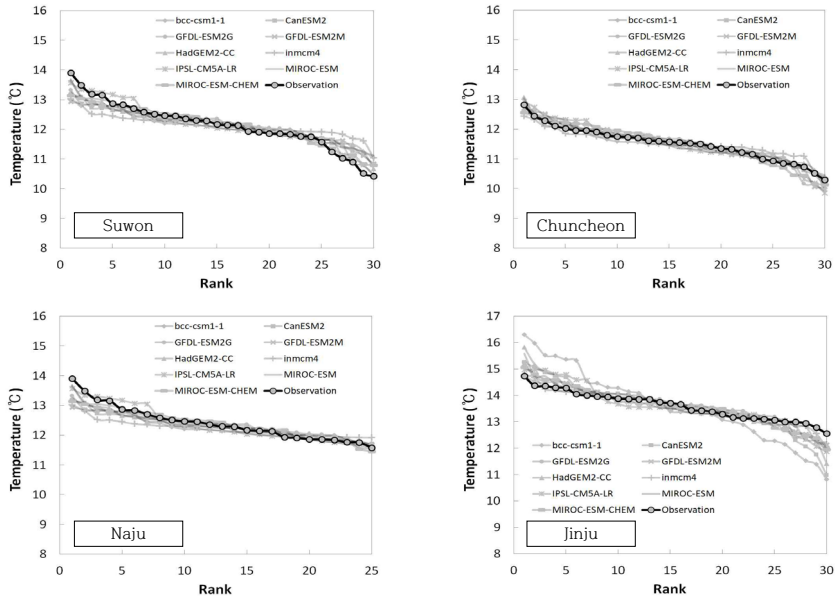


Fig. 4.6. Comparisons among the observed value of annual average temperature and reproduced values for each GCMs

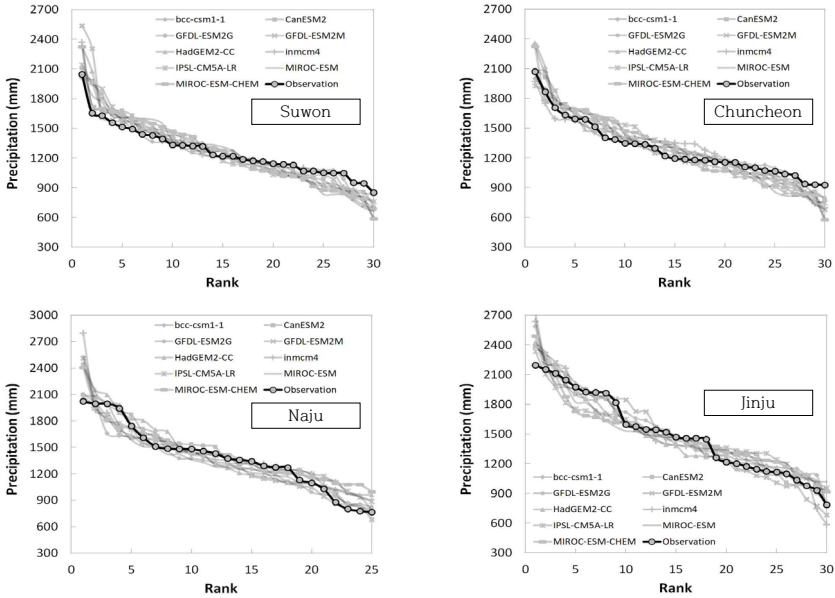


Fig. 4.7 Comparisons among the observed value of annual total precipitation and reproduced values for each GCMs

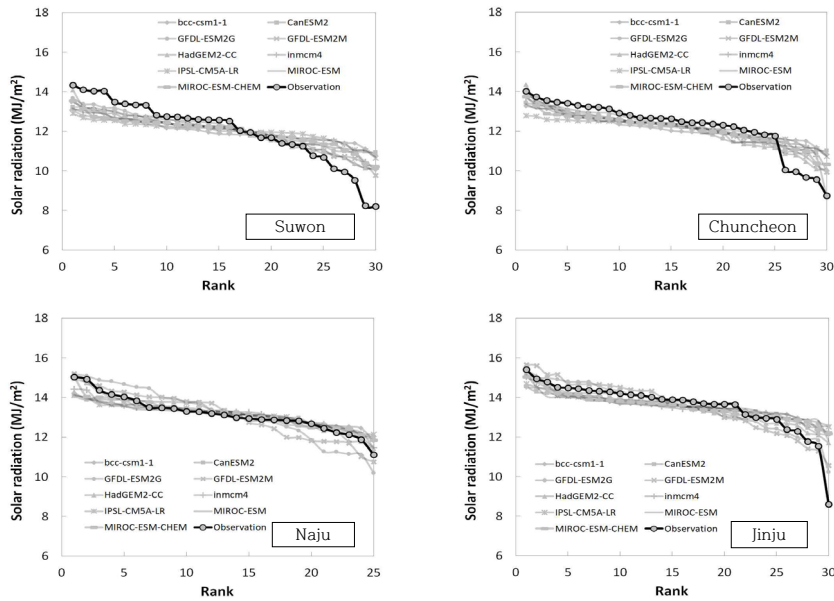


Fig. 4.8 Comparisons among the observed value of annual average solar radiation and reproduced values for each GCMs

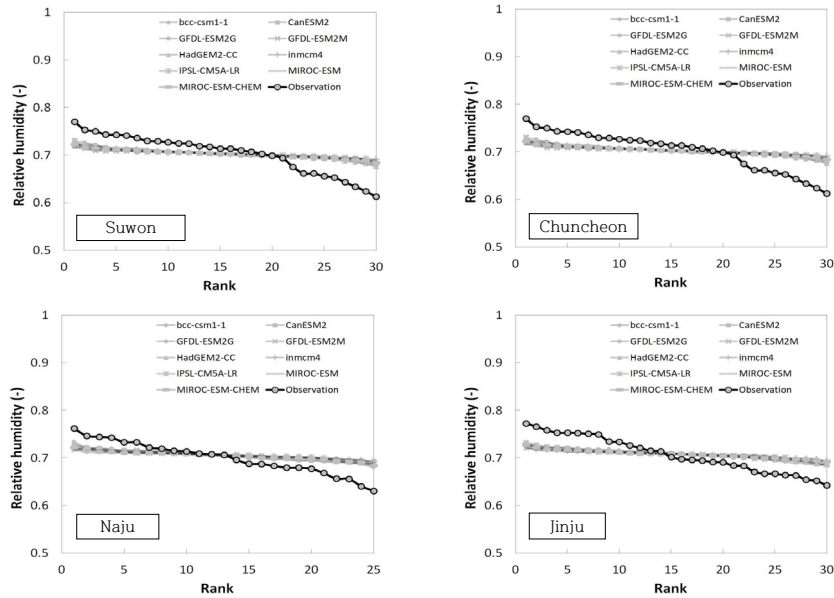


Fig 4.9 Comparisons among the observed value of annual average relative humidity and reproduced values for each GCMs

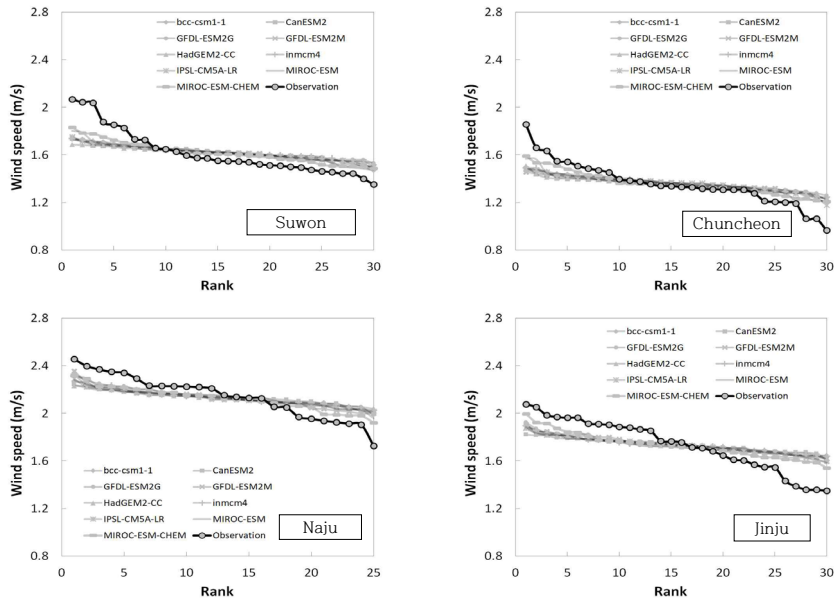


Fig. 4.10 Comparisons among the observed value of annual average wind speed and reproduced values for each GCMs

기후변화 시나리오의 불확실성을 평가하기 위하여 GCM 별 30년 단위 기상자료의 변동을 도식화 하였다 (Fig.4.11~14). 과거 관측기간 GCM들의 평균값을 기준값 (baseline)으로 선정하였으며 각 GCM의 예측 결과를 비교하였다.

일사량의 경우 MME의 평균값 변화를 살펴보면 RCP4.5 시나리오와 RCP8.5 시나리오 모두 미래 기간의 일사량 변화가 과거 기준기간의 일사량과 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 가까운 미래 (2025s)에서 먼 미래 (2085s)로 갈수록 예측의 불확실성이 증가하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오가 RCP4.5 시나리오에 비하여 불확실성의 크기가 큰 것으로 판단된다.

불확실성 증가의 원인은 각 GCM마다 다른 미래를 예측하기 때문

인 것으로 나타났다. RCP4.5, 8.5 시나리오에 대하여 같은 GCM일 경우 대체로 변화 경향이 유사한 것으로 나타났으며 개별 GCM의 경우 예측의 범위에는 변화가 보이지 않았으나 2025s, 2055s, 2085s의 해당 기간 내 GCM간의 예측결과는 상당한 차이가 있는 것으로 나타났다. HadGEM2-CC, IPSL-CM5A-LR의 경우는 연 평균 일사량이 상당히 감소할 것으로 예측하였으며 반대로 MIROC-ESM-CHEM의 경우는 일사량이 크게 증가하는 것으로 예측하였다. 2085s의 일사량은 RCP4.5 시나리오의 GCM간 크게는 3 MJ/m^2 , RCP8.5 시나리오의 경우 크게는 4 MJ/m^2 이상 차이를 보였다.

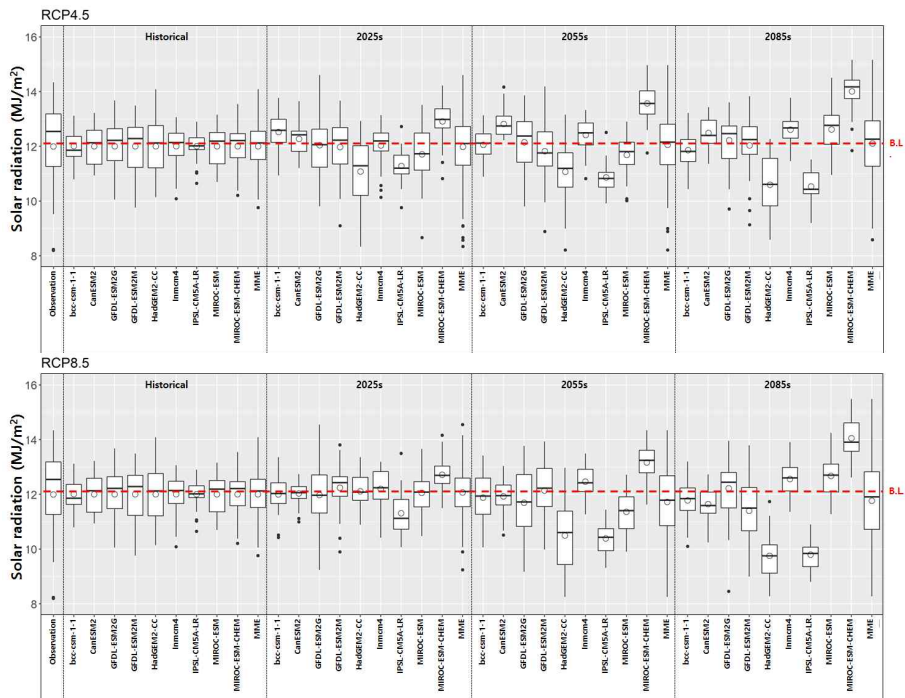


Fig. 4.11 Changes in solar radiation according to climate change for individual GCMs (Suwon)

연 평균기온의 경우 MME의 평균값 변화를 살펴보면 RCP4.5 시나리오와 RCP8.5 시나리오 모두 미래 기간의 연 평균기온이 기준값보다 증가하는 경향을 보였으며 모든 GCM이 일관적으로 연 평균기온의 상승을 예측하였다. 그러나 가까운 미래(2025s)에서 먼 미래(2085s)로 갈수록 예측의 불확실성이 증가하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오가 RCP4.5 시나리오에 비하여 불확실성의 크기가 큰 것으로 판단된다.

연 평균기온의 경우도 일사량과 마찬가지로 불확실성 증가의 원인이 각 GCM마다 다른 미래를 예측하기 때문인 것으로 나타났다. RCP4.5, 8.5 시나리오에 대하여 같은 GCM일 경우 대체로 변화 경향이 유사한 것으로 나타났으며 개별 GCM의 경우 예측의 범위에는 변화가 보이지 않았으나 2025s, 2055s, 2085s의 해당 기간 내 GCM간의 예측결과는 상당한 차이가 있는 것으로 나타났다. GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M, Inmcm4의 경우는 연 평균기온 증가가 크지 않은 것으로 예측하였으나 반대로 HadGEM2-CC, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM의 경우는 연 평균기온이 크게 증가하는 것으로 예측하였다. 2085s의 평균기온은 RCP4.5 시나리오의 GCM간 크기는 3.0°C , RCP8.5 시나리오의 경우 크기는 4.5°C 의 차이를 보였다.

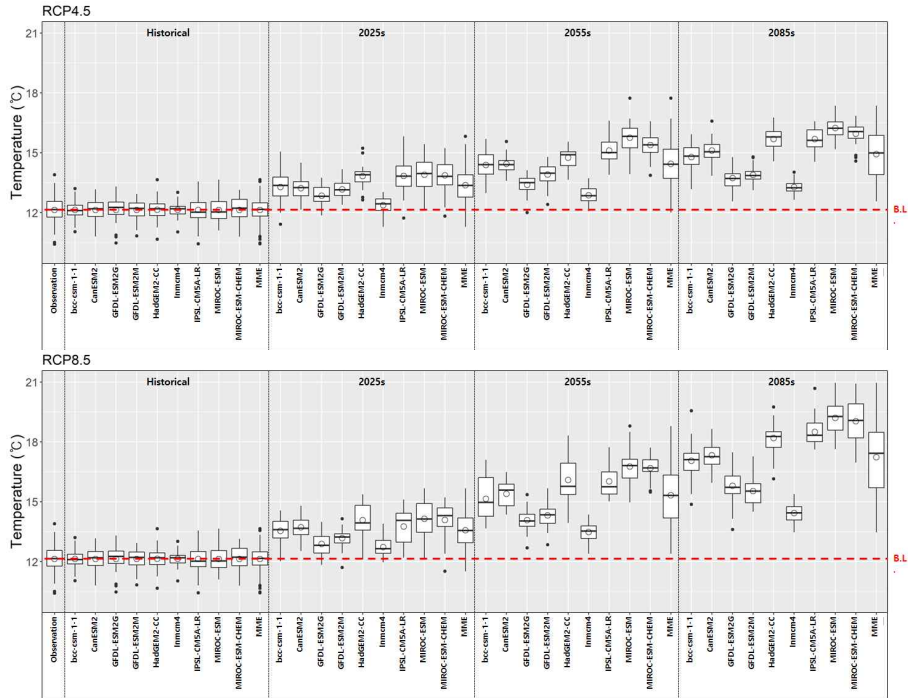


Fig. 4.12 Changes in mean temperature according to climate change for individual GCMs

연 강수량의 경우 MME의 평균값 변화를 살펴보면 RCP4.5 시나리오와 RCP8.5 시나리오 모두 미래 기간의 연 강수량이 기준값보다 증가하는 경향을 보였으며 모든 GCM이 일관적으로 연 강수량의 상승을 예측하였다. 그러나 가까운 미래 (2025s)에서 먼 미래 (2085s)로 갈수록 예측의 불확실성이 증가하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오가 RCP4.5 시나리오에 비하여 불확실성의 크기가 큰 것으로 판단된다.

연 강수량의 경우도 불확실성 증가의 원인이 각 GCM마다 다른 미래를 예측하기 때문인 것으로 나타났다. 개별 GCM의 경우 2025s, 2055s, 2085s의 해당 기간 별 예측의 범위에는 변화가 보이지

않았으나 2025s, 2055s, 2085s의 해당 기간 내 GCM간의 예측결과는 차이가 있는 것으로 나타났다. 그러나 연 평균 일사량, 연 평균 기온에 비하여 불확실성이 크진 않은 것으로 보인다. 그러나 이는 강수량의 연차간 변동이 다른 기후인자에 비하여 매우 크기 때문인 것으로 판단된다. RCP8.5 시나리오에 대하여 CanESM2, GFDL-ESM2G, IPSL-CM5A-LR은 연 강수량이 크게 증가하는 것으로 예측하였으나 MIROC-ESM은 연 강수량 증가가 다른 GCM에 비하여 상대적으로 크지 않은 것으로 예측하였다. 2085s의 연 강수량은 RCP8.5 시나리오의 경우 크기는 500 mm 이상의 차이를 보였다.

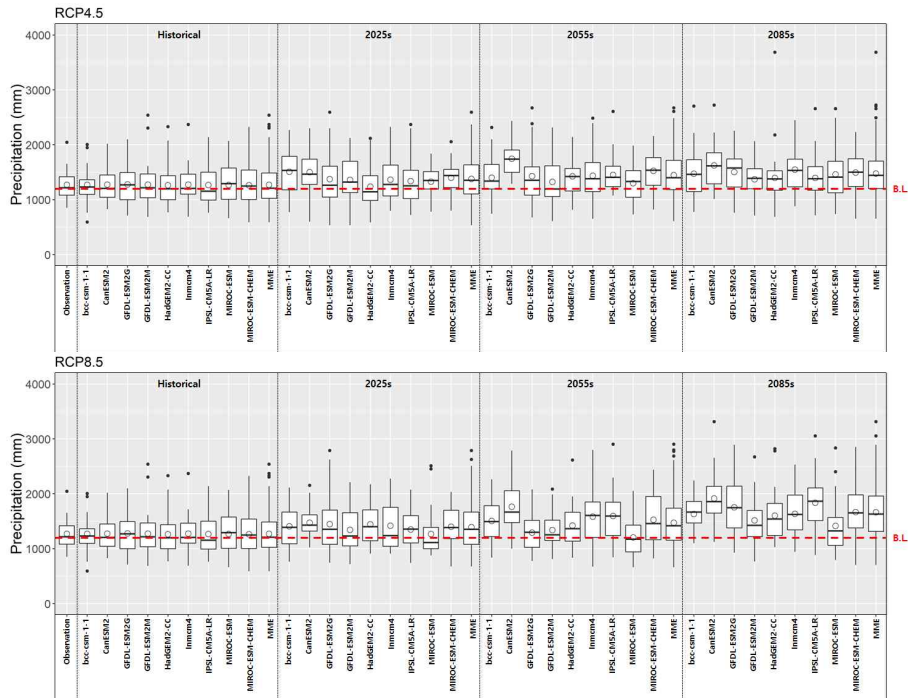


Fig. 4.13 Changes in precipitation according to climate change for individual GCMs

4.2.3 기후인자 상관성 분석

기후변화에 따른 논 필요수량, 논벼 생산량, 논 질소 유출 부하량 변화의 원인을 판단하기 위해서는 기후인자와 모의결과의 상관성을 분석할 필요가 있다. 따라서 다중선형회기분석 (multiple linear regression)을 이용하여 상관성 분석을 하였으며 분석 툴로서 R의 car 통계패키지의 lm() 함수를 이용하였다. 독립변수는 기후인자인 평균기온, 일사량, 강수량, 풍속, 상대습도로 설정하였으며 종속변수는 증발산량, 증발량, 증산량, 유출량, 논벼 생산량, 논 필요수량, 질소 유출 부하량으로 설정하였다.

기후인자와 모의결과의 상관성 분석결과는 Table 4.4와 같다. 논벼 생산량의 경우 일사량과 매우 밀접한 양의 상관관계가 있는 것으로 나타났으며 연평균기온과 부의 상관관계가 있으나 유의하지 않은 것으로 평가되었다. 논 필요수량의 경우 연평균기온과 유의한 양의 상관관계가, 일사량과는 밀접한 양의 상관관계가 있는 것으로 나타났으며 강수량과는 유의한 음의 상관관계가 있는 것으로 분석되었다. 논 질소 유출 부하량의 경우 기후인자와는 상관성이 크지 않은 것으로 평가되었으며 질소 유출 부하량과 상관성이 큰 강수량과 어느 정도 유의한 양의 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 논 질소 유출 부하량은 시비량과 시비시기, 강수량과 시기 등 다양한 요인이 영향을 주기 때문인 것으로 판단된다.

Table 4.5는 논 필요수량 및 유출량과 연관이 있을 것으로 판단되는 증발산량, 증산량, 증발량, 유출량과 기후인자와의 상관성을 분석한 결과이다. 논 유출량의 경우 강수량과 매우 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났으며 다른 인자와는 유의한 상관관계가 보이지 않았

다. 증발산량의 경우 일사량과 매우 밀접한 상관관계가 나타났으며 평균기온, 풍속, 상대습도와도 유의한 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 증발량, 증산량도 일사량과 매우 밀접한 상관관계를 보였으며 증발량은 평균기온과, 증산량은 풍속과 어느 정도 유의한 상관관계가 있는 것으로 나타났다.

Table 4.4 The result of correlation analysis between climatic factors virus rice yield, irrigation demand and mineral nitrogen yield in paddy field using multiple linear regression

Climatic factor	Rice yield		Irrigation demand		Mineral N yield	
	Estimate	Pr(> t)	Estimate	Pr(> t)	Estimate	Pr(> t)
Tmean	-0.24	0.121	45.15	0.039*	2.39	0.412
SRAD	0.39	0.000***	30.80	0.005**	1.85	0.191
WSPD	0.04	0.955	12.76	0.904	0.12	0.994
RHUM	5.93	0.174	-148.80	0.799	40.04	0.620
PRCP	0.00	0.956	-0.16	0.014*	0.02	0.079•

*** Pr < 0.001, ** Pr < 0.01, * Pr < 0.05, • Pr < 0.1

Table 4.5 The result of correlation analysis between climatic factors virus runoff evapotranspiration, evaporation and transpiration in paddy filed using multiple linear regression

Climatic factor	Runoff		Evapotranspiration		Evaporation		Transpiration	
	Estimate	Pr(> t)	Estimate	Pr(> t)	Estimate	Pr(> t)	Estimate	Pr(> t)
Tmean	11.32	0.575	19.61	0.012*	10.78	0.003**	8.83	0.234
SRAD	10.84	0.268	26.01	0.000***	8.71	0.000***	17.30	0.000***
WSPD	-140.64	0.174	108.21	0.007**	27.32	0.109	80.88	0.036*
RHUM	-170.73	0.761	-458.72	0.032*	-137.00	0.144	-321.70	0.124
PRCP	0.81	0.000***	-0.01	0.579	-0.01	0.344	0.00	0.898

*** Pr < 0.001, ** Pr < 0.01, * Pr < 0.05, • Pr < 0.1

4.3 기후변화 영향평가

4.3.1 기후변화에 따른 논 필요수량 변동 평가

기후변화 시나리오에 따른 논 필요수량 변동 평가를 위하여 9개의 GCM을 이용한 MME 접근방법을 이용하였으며 연구대상 지역에 대한 연간, 월간 논 필요수량 변동의 경향을 시각화 하였다. 논 필요수량 변동과 관련하여 연관이 큰 논 증발량, 논벼 증산량, 논 증발산량의 연간, 월간 변동도 함께 평가하였다.

연간 변동평가의 경우 연도별 9개 GCM의 평균값, 90% 신뢰구간, 99% 신뢰구간, 최대·최소값의 범위를 표시하였으며 분석기간을 1976년~2005년 기간을 과거기준기간 (Historical), 2011년~2040년 기간을 2025s, 2041년~2070년 기간을 2055s, 2071년~2100년 기간을 2085s로 30년 단위로 구분하여 논 증발량, 논벼 증산량, 논 증발산량, 논 필요수량 변동을 평가하였다. 월간 변동평가의 경우 Historical, 2025s, 2055s, 2085s 기간에 대하여 9개 GCM의 월별 30년 평균의 평균값, 90% 신뢰구간, 99% 신뢰구간, 최대·최소값의 범위를 표시하였다.

가. 연간 변동평가 결과

논 증발량은 RCP4.5, 8.5 시나리오 모두 모든 지역에서 상승하는 경향을 보였다 (Table 4.6, Fig. 4.14).

중서부 평야인 수원지역의 경우 RCP4.5 시나리오에 대하여 논 증발량이 과거기준기간 309.1 mm 대비 2025년대 323.3 mm, 2055년대 349.3 mm, 2085년대 358.4 mm로 각각 4.6%, 13.0%, 15.9%가 증가하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오의 경우 2025년대 333.3

mm, 2055년대 353.9 mm, 2085년대 375.2 mm로 각각 7.8%, 14.5%, 21.4%가 증가하는 것으로 나타났다.

중부 내륙인 춘천의 경우 RCP4.5 시나리오에 대하여 논 증발량이 과거기준기간 321.3 mm 대비 2025년대 339.5 mm, 2055년대 367.3 mm, 2085년대 379.7 mm로 각각 5.7%, 14.3%, 18.2%가 증가하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오의 경우 2025년대 351.8 mm, 2055년대 375.9 mm, 2085년대 396.7 mm로 각각 9.5%, 17.0%, 23.5%가 증가하는 것으로 나타났다.

남부 호남평야인 나주지역의 경우 RCP4.5 시나리오에 대하여 논 증발량이 과거기준기간 398.6 mm 대비 2025년대 429.0 mm, 2055년대 464.3 mm, 2085년대 478.8 mm로 각각 7.6%, 16.5%, 20.1%가 증가하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오의 경우 2025년대 438.1 mm, 2055년대 477.7 mm, 2085년대 507.8 mm로 각각 9.9%, 19.8%, 27.4%가 증가하는 것으로 나타났다.

남부 해안인 진주지역의 경우 RCP4.5 시나리오에 대하여 논 증발량이 과거기준기간 353.6 mm 대비 2025년대 379.8 mm, 2055년대 410.9 mm, 2085년대 423.7 mm로 각각 7.4%, 16.2%, 19.8%가 증가하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오의 경우 2025년대 388.0 mm, 2055년대 425.5 mm, 2085년대 453.1 mm로 각각 9.7%, 20.4%, 28.2%가 증가하는 것으로 나타났다.

논 증발량의 증가 경향은 기온상승폭이 큰 RCP8.5 시나리오가 RCP4.5 시나리오에 비하여 큰 것으로 나타났으며 중부지역보다 남부지역에서 변화 폭이 큰 것으로 나타났다.

논벼 증산량은 RCP4.5, 8.5 시나리오 모두 모든 지역에서 감소하는 경향을 보였다 (Table 4.7, Fig. 4.15).

수원지역의 경우 RCP4.5 시나리오에 대하여 논 증발량이 과거기준기간 290.8 mm 대비 2025년대 272.6 mm, 2055년대 244.1 mm, 2085년대 232.5 mm로 각각 6.2%, 16.1%, 20.0%가 감소하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오의 경우 2025년대 269.2 mm, 2055년대 227.3 mm, 2085년대 210.6 mm로 각각 7.4%, 21.8%, 27.6%가 감소하는 것으로 나타났다.

춘천의 경우 RCP4.5 시나리오에 대하여 논 증발량이 과거기준기간 249.2 mm 대비 2025년대 235.2 mm, 2055년대 212.4 mm, 2085년대 200.8 mm로 각각 5.6%, 14.8%, 19.4%가 감소하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오의 경우 2025년대 232.7 mm, 2055년대 198.2 mm, 2085년대 186.0 mm로 각각 6.6%, 20.5%, 25.4%가 감소하는 것으로 나타났다.

나주지역의 경우 RCP4.5 시나리오에 대하여 논 증발량이 과거기준기간 336.5 mm 대비 2025년대 317.4 mm, 2055년대 285.4 mm, 2085년대 275.9 mm로 각각 5.7%, 15.2%, 18.0%가 감소하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오의 경우 2025년대 308.1 mm, 2055년대 275.7 mm, 2085년대 254.3 mm로 각각 8.5%, 18.1%, 24.4%가 감소하는 것으로 나타났다.

진주지역의 경우 RCP4.5 시나리오에 대하여 논 증발량이 과거기준기간 281.0 mm 대비 2025년대 271.0 mm, 2055년대 245.1 mm, 2085년대 236.5 mm로 각각 3.6%, 12.8%, 15.8%가 감소하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오의 경우 2025년대 262.7 mm, 2055년대 236.2 mm, 2085년대 219.0 mm로 각각 6.5%, 15.9%, 22.0%가 감소하는 것으로 나타났다.

논벼 증산량의 감소 경향은 기온상승폭이 큰 RCP8.5 시나리오가

RCP4.5 시나리오에 비하여 큰 것으로 나타났으며 수원, 춘천, 나주, 진주 순으로 변화 폭이 큰 것으로 나타났다.

논 증발산량은 증발량 증가와 증산량 감소의 상쇄효과로 인하여 RCP4.5, 8.5 시나리오 모두 뚜렷한 변화 경향이 나타나지 않았다 (Table 4.8, Fig. 4.16).

수원지역의 경우 RCP4.5 시나리오에 대하여 논 증발량이 과거기준기간 599.9 mm 대비 2025년대 595.9 mm, 2055년대 593.4 mm, 2085년대 591.0 mm로 각각 0.7%, 1.1%, 1.5%가 감소하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오의 경우 2025년대 602.5 mm로 0.4%가 증가하는 것으로 나타났으나 2055년대 581.3 mm, 2085년대 585.8 mm로 각각 3.1%, 2.4%가 다시 감소하는 경향을 나타냈다.

춘천의 경우 RCP4.5 시나리오에 대하여 논 증발량이 과거기준기간 570.5 mm 대비 2025년대 574.8 mm, 2055년대 579.7 mm, 2085년대 580.5 mm로 각각 0.7%, 1.6%, 1.7%가 증가하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오의 경우 2025년대 584.5 mm, 2055년대 574.1 mm, 2085년대 582.7 mm로 각각 2.4%, 0.6%, 2.1%가 증가하는 것으로 나타났다.

나주지역의 경우 RCP4.5 시나리오에 대하여 논 증발량이 과거기준기간 735.1 mm 대비 2025년대 746.4 mm, 2055년대 749.7 mm, 2085년대 754.7 mm로 각각 1.5%, 2.0%, 2.7%가 증가하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오의 경우 2025년대 746.2 mm, 2055년대 753.3 mm, 2085년대 762.1 mm로 각각 1.5%, 2.5%, 3.7%가 증가하는 것으로 나타났다.

진주지역의 경우 RCP4.5 시나리오에 대하여 논 증발량이 과거기준기간 634.5 mm 대비 2025년대 650.7 mm, 2055년대 656.0 mm,

2085년대 660.2 mm로 각각 2.6%, 3.4%, 4.0%가 증가하는 것으로 나타났다으며 RCP8.5 시나리오의 경우 2025년대 650.6 mm, 2055년대 661.8 mm, 2085년대 672.2 mm로 각각 2.5%, 4.3%, 5.9%가 증가하는 것으로 나타났다.

Allen *et al.* (2003)은 실험연구와 Panman-Monteith 공식을 기반으로 기온, 이산화탄소 농도 상승에 따른 엽면적지수, 캐노피 저항변화를 고려하여 기온, 이산화탄소 농도 상승조건에서 증발산량이 증가한다고 보고하였다. 그러나 본 연구에서는 기온상승에 따른 논 벼 생육기간의 변화가 반영된 결과로서 특정시기에 측정하여 비교한 Allen *et al.* (2003)의 연구와는 차이가 있다. 또한, Allen *et al.* (2003) 연구의 대상작물은 콩이며 대기온도를 18~28 °C와 34~44 °C로 12 °C 차이를 두고 제어하였고, 대기중 이산화탄소 농도는 350 ppm과 700 ppm으로 제어한 연구이다. 이는 본 연구의 RCP8.5 시나리오에 비해 기온변화가 2배 이상 크며 이산화탄소 농도 변화는 약 100 ppm이 적다. 또한, Lai *et al.* (1998)은 대기 중 이산화탄소의 증가가 작물의 증산량을 줄이기 때문에 쌀 생산을 위한 수자원 활용에 긍정적인 영향을 미친다고 보고하였다. 본 연구에서도 RCP8.5 시나리오의 높은 이산화탄소 농도변화가가 작물 증산량 감소에 영향을 미친 것으로 판단된다. 따라서 RCP4.5, RCP8.5 시나리오 모두 증발산량 변화가 뚜렷하지 않은 것으로 판단된다.

논 필요수량은 증발산량 변화가 크지 않아 RCP4.5, 8.5 시나리오 모두 뚜렷한 변화 경향이 나타나지 않았다(Table 4.9, Fig. 4.17).

수원지역의 경우 RCP4.5 시나리오에 대하여 논 필요수량이 과거 기준기간 628.9 mm 대비 2025년대 630.8 mm로 0.3%가 증가하는 것으로 나타났으나 2055년대 621.0 mm, 2085년대 627.9 mm로 각각

1.3%, 0.2% 감소하는 것으로 모의되었다. RCP8.5 시나리오의 경우 2025년대 630.7 mm, 2055년대 631.6 mm로 각각 0.3%, 0.4%가 증가하는 것으로 나타났으나 2085년대 581.3 mm로 1.3%가 다시 감소하는 경향을 나타냈다.

춘천의 경우 RCP4.5 시나리오에 대하여 논 필요수량이 과거기준 기간 635.6 mm 대비 2025년대 635.0 mm, 2055년대 632.2 mm로 각각 0.1%, 0.5%가 감소하는 경향을 보였으나 2085년대 638.6 mm로 0.5%가 증가하는 것으로 나타났다. RCP8.5 시나리오의 경우 2025년대 640.2 mm, 2055년대 640.3 mm로 각각 0.7%, 0.7%가 증가하는 것으로 나타났으나 2085년대 632.1 mm로 과거기준기간 대비 0.6%가 감소하는 경향을 나타냈다.

나주지역의 경우 RCP4.5 시나리오에 대하여 논 필요수량이 과거 기준기간 702.2 mm 대비 2025년대 709.0 mm, 2055년대 709.6 mm, 2085년대 711.6 mm로 각각 1.0%, 1.1%, 1.3%가 증가하는 것으로 나타났다. RCP8.5 시나리오의 경우 2025년대 710.4 mm, 2055년대 717.6 mm, 2085년대 721.0 mm로 각각 1.2%, 2.2%, 2.7%가 증가하는 것으로 나타났다.

진주지역의 경우 RCP4.5 시나리오에 대하여 논 필요수량이 과거 기준기간 645.9 mm 대비 2025년대 648.5 mm, 2055년대 651.2 mm, 2085년대 648.4 mm로 각각 0.4%, 0.8%, 0.4%가 증가하는 것으로 나타났다. RCP8.5 시나리오의 경우 2025년대 650.9 mm, 2055년대 657.9 mm, 2085년대 650.6 mm로 각각 0.8%, 1.9%, 1.6%가 증가하는 것으로 나타났다.

Table 4.6 Evaluation result for climate change impact on paddy evaporation

Scenario	Period	Suwon			Chuncheon			Naju			Jinju		
		Value	Increment (%)	St.De v.	Value	Increment (%)	St.De v.	Value	Increment (%)	St.De v.	Value	Increment (%)	St.De v.
Historical		309.1	–	31.0	321.3	–	31.7	398.6	–	37.0	353.6	–	34.3
RCP4.5	2025s	323.3	4.6	39.2	339.5	5.7	40.8	429.0	7.6	48.2	379.8	7.4	42.5
	2055s	349.3	13.0	39.9	367.3	14.3	42.0	464.3	16.5	51.2	410.9	16.2	42.1
	2085s	358.4	15.9	40.9	379.7	18.2	40.7	478.8	20.1	47.4	423.7	19.8	40.4
RCP8.5	2025s	333.3	7.8	37.6	351.8	9.5	37.1	438.1	9.9	51.0	388.0	9.7	43.2
	2055s	353.9	14.5	39.1	375.9	17.0	40.5	477.7	19.8	48.3	425.5	20.4	41.0
	2085s	375.2	21.4	51.7	396.7	23.5	53.0	507.8	27.4	57.4	453.1	28.2	50.8

Table 4.7 Evaluation result for climate change impact on paddy rice transpiration

Scenario	Period	Suwon			Chuncheon			Naju			Jinju		
		Value	Increment (%)	St.De v.	Value	Increment (%)	St.De v.	Value	Increment (%)	St.De v.	Value	Increment (%)	St.De v.
Historical		290.8	–	39.4	249.2	–	38.9	336.5	–	41.4	281.0	–	43.1
RCP4.5	2025s	272.6	–6.2	51.9	235.2	–5.6	45.3	317.4	–5.7	50.3	271.0	–3.6	52.2
	2055s	244.1	–16.1	47.3	212.4	–14.8	44.2	285.4	–15.2	52.5	245.1	–12.8	49.6
	2085s	232.5	–20.0	53.2	200.8	–19.4	48.2	275.9	–18.0	54.0	236.5	–15.8	53.7
RCP8.5	2025s	269.2	–7.4	45.2	232.7	–6.6	42.9	308.1	–8.5	48.6	262.7	–6.5	52.2
	2055s	227.3	–21.8	49.2	198.2	–20.5	46.2	275.7	–18.1	51.4	236.2	–15.9	50.1
	2085s	210.6	–27.6	51.9	186.0	–25.4	48.0	254.3	–24.4	52.9	219.0	–22.0	54.6

Table 4.8 Evaluation result for climate change impact on paddy evapotranspiration

Scenario	Period	Suwon			Chuncheon			Naju			Jinju		
		Value	Incre- ment (%)	St.De v.	Value	Incre- ment (%)	St.De v.	Value	Incre- ment (%)	St.De v.	Value	Incre- ment (%)	St.De v.
Historical		599.9	–	50.8	570.5	–	51.6	735.1	–	55.4	634.5	–	55.8
RCP4.5	2025s	595.9	–0.7	64.7	574.8	0.7	60.8	746.4	1.5	61.7	650.7	2.6	62.3
	2055s	593.4	–1.1	60.1	579.7	1.6	59.1	749.7	2.0	66.2	656.0	3.4	59.1
	2085s	591.0	–1.5	60.9	580.5	1.7	60.8	754.7	2.7	61.1	660.2	4.0	60.0
RCP8.5	2025s	602.5	0.4	52.6	584.5	2.4	51.4	746.2	1.5	54.9	650.6	2.5	58.9
	2055s	581.3	–3.1	65.3	574.1	0.6	65.9	753.3	2.5	64.5	661.8	4.3	62.5
	2085s	585.8	–2.4	75.0	582.7	2.1	74.9	762.1	3.7	73.9	672.2	5.9	72.7

Table 4.9 Evaluation result for climate change impact on paddy irrigation demand

Scenario	Period	Suwon			Chuncheon			Naju			Jinju		
		Value	Incre- ment (%)	St.De v.	Value	Incre- ment (%)	St.De v.	Value	Incre- ment (%)	St.De v.	Value	Incre- ment (%)	St.De v.
Historical		628.9	–	55.1	635.6	–	57.8	702.2	–	70.9	645.9	–	67.2
RCP4.5	2025s	630.8	0.3	61.6	635.0	–0.1	65.9	709.0	1.0	81.2	648.5	0.4	79.5
	2055s	621.0	–1.3	70.2	632.2	–0.5	69.4	709.6	1.1	81.1	651.2	0.8	75.9
	2085s	627.9	–0.2	67.7	638.6	0.5	71.9	711.6	1.3	85.1	648.4	0.4	78.5
RCP8.5	2025s	630.7	0.3	67.1	640.2	0.7	67.3	710.4	1.2	79.0	650.9	0.8	82.5
	2055s	631.6	0.4	71.2	640.3	0.7	73.3	717.6	2.2	80.8	657.9	1.9	73.8
	2085s	620.6	–1.3	80.5	632.1	–0.6	89.9	721.0	2.7	109.4	656.0	1.6	99.2

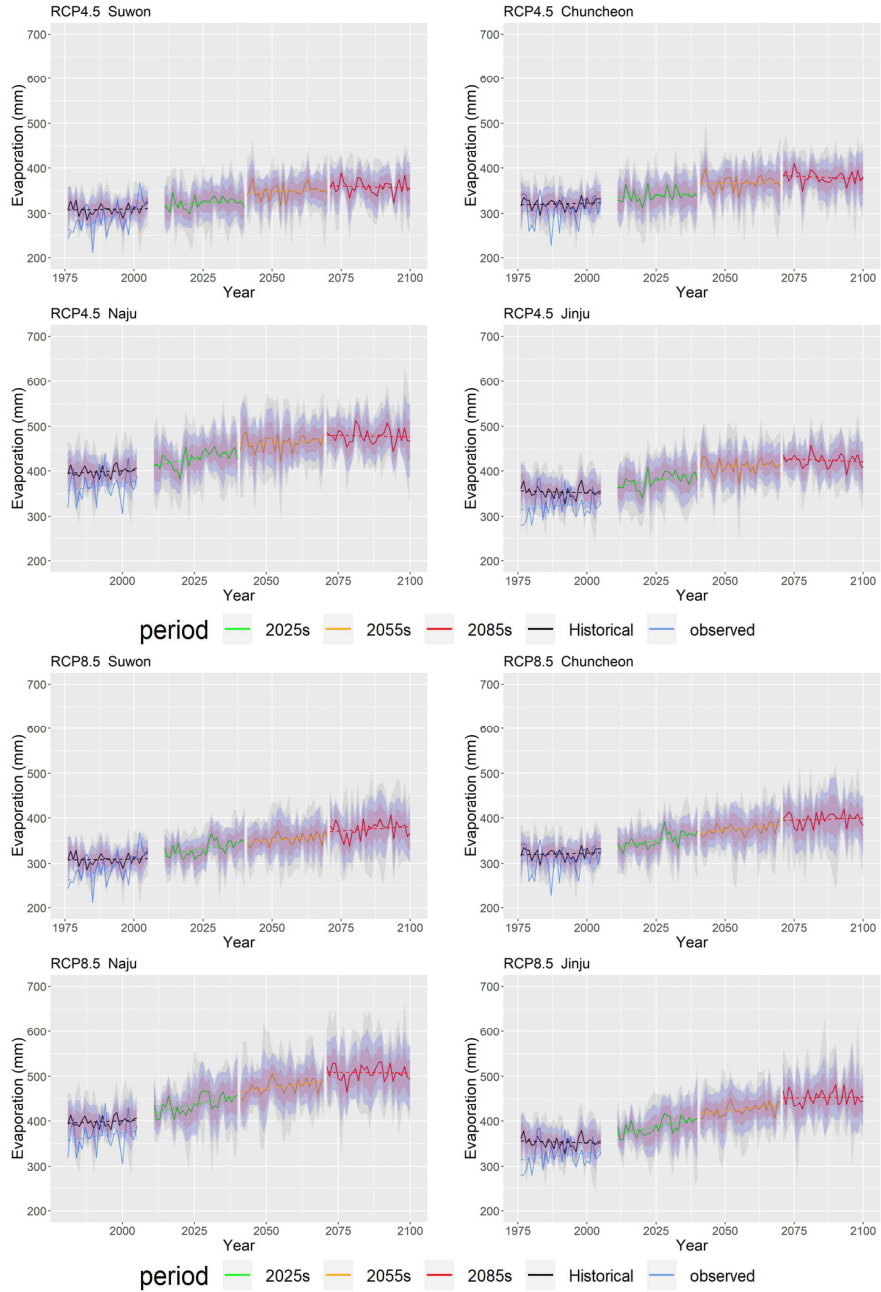


Fig. 4.14 The evaluation result of the climate change impact on paddy evaporation. 90%(purple), 99%(blue) confidence intervals and range of Max., Min. values(grey) are shown in the graph

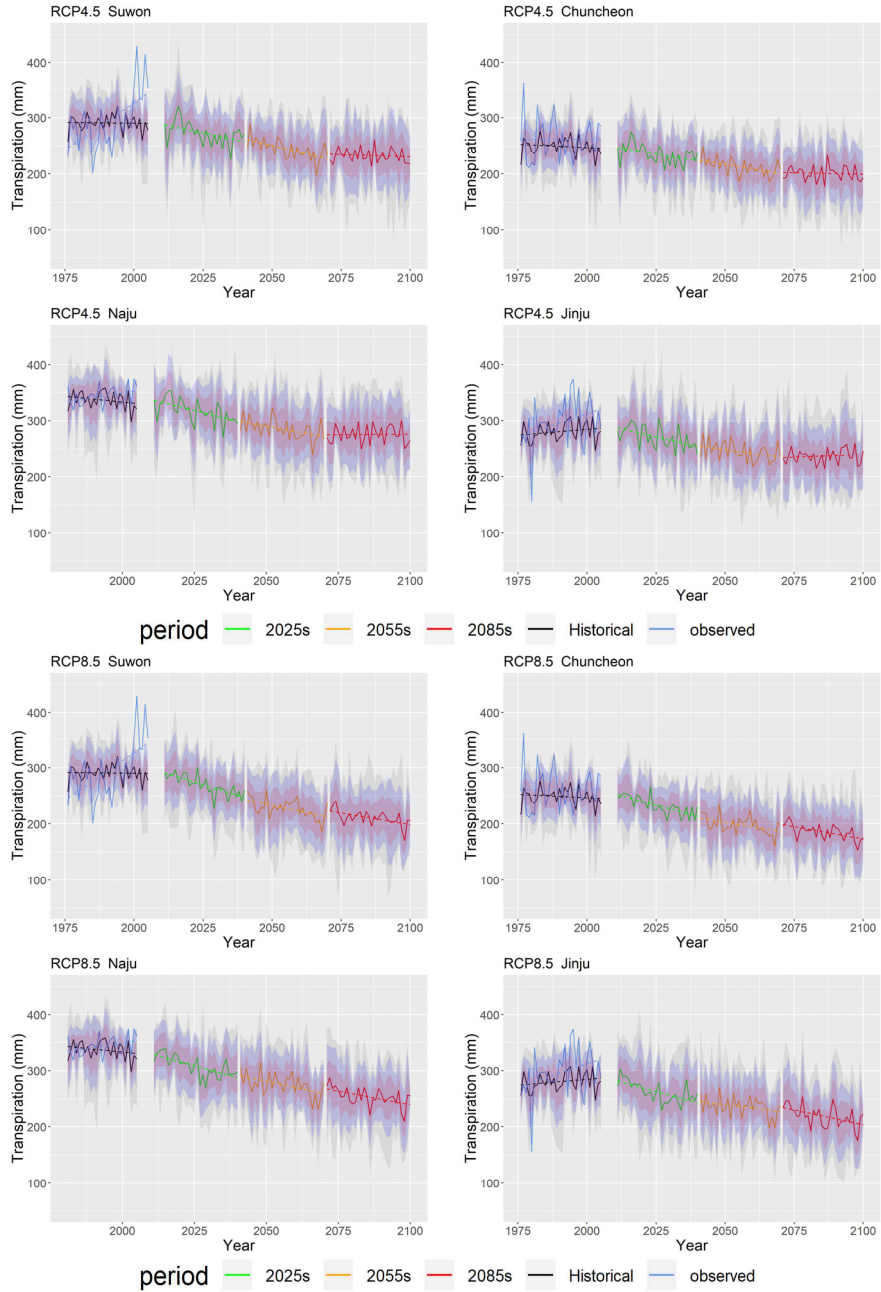


Fig. 4.15 The evaluation result of the climate change impact on paddy transpiration. 90%(purple), 99%(blue) confidence intervals and range of Max., Min. values(grey) are shown in the graph

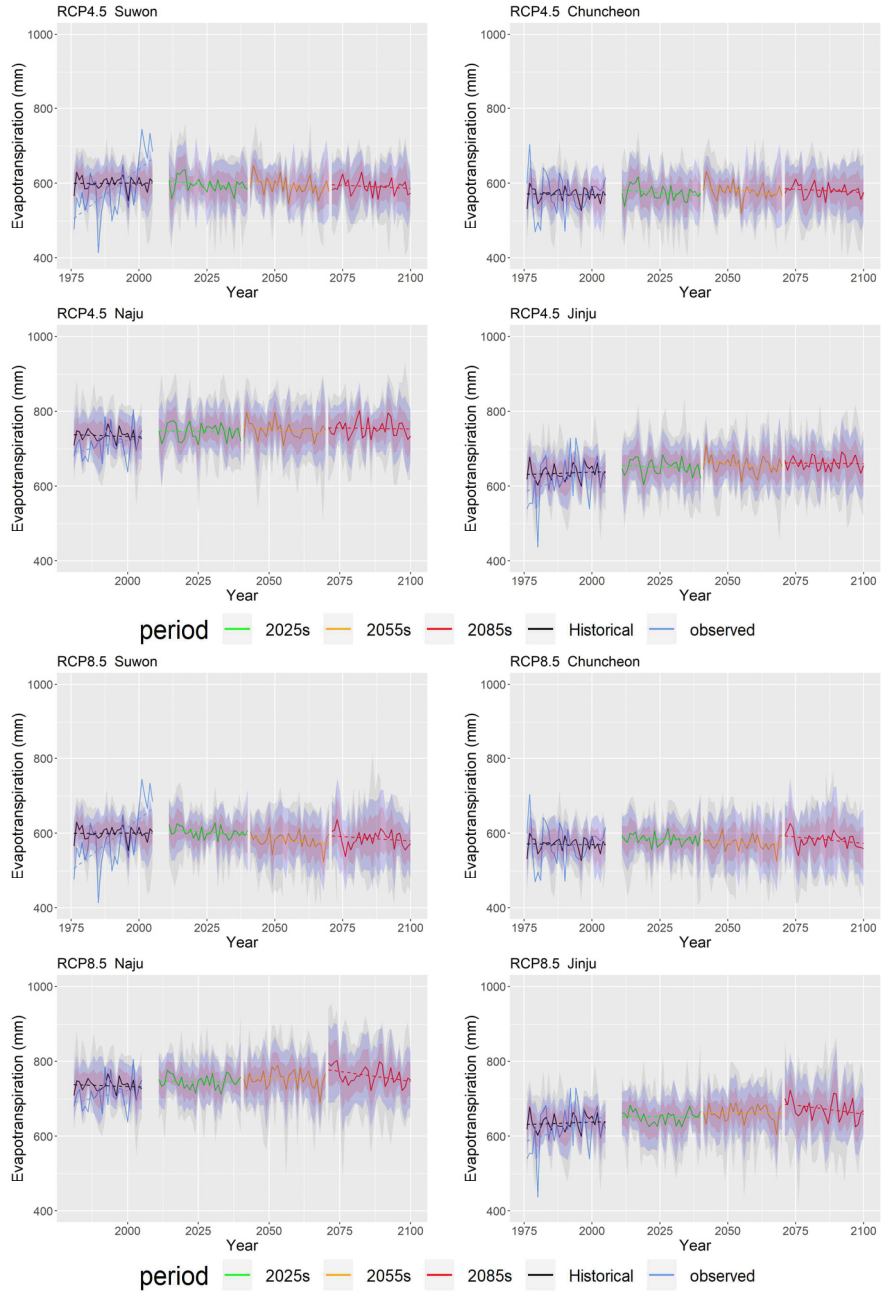


Fig. 4.16 The evaluation result of the climate change impact on paddy evapotranspiration. 90%(purple), 99%(blue) confidence intervals and range of Max., Min. values(grey) are shown in the graph

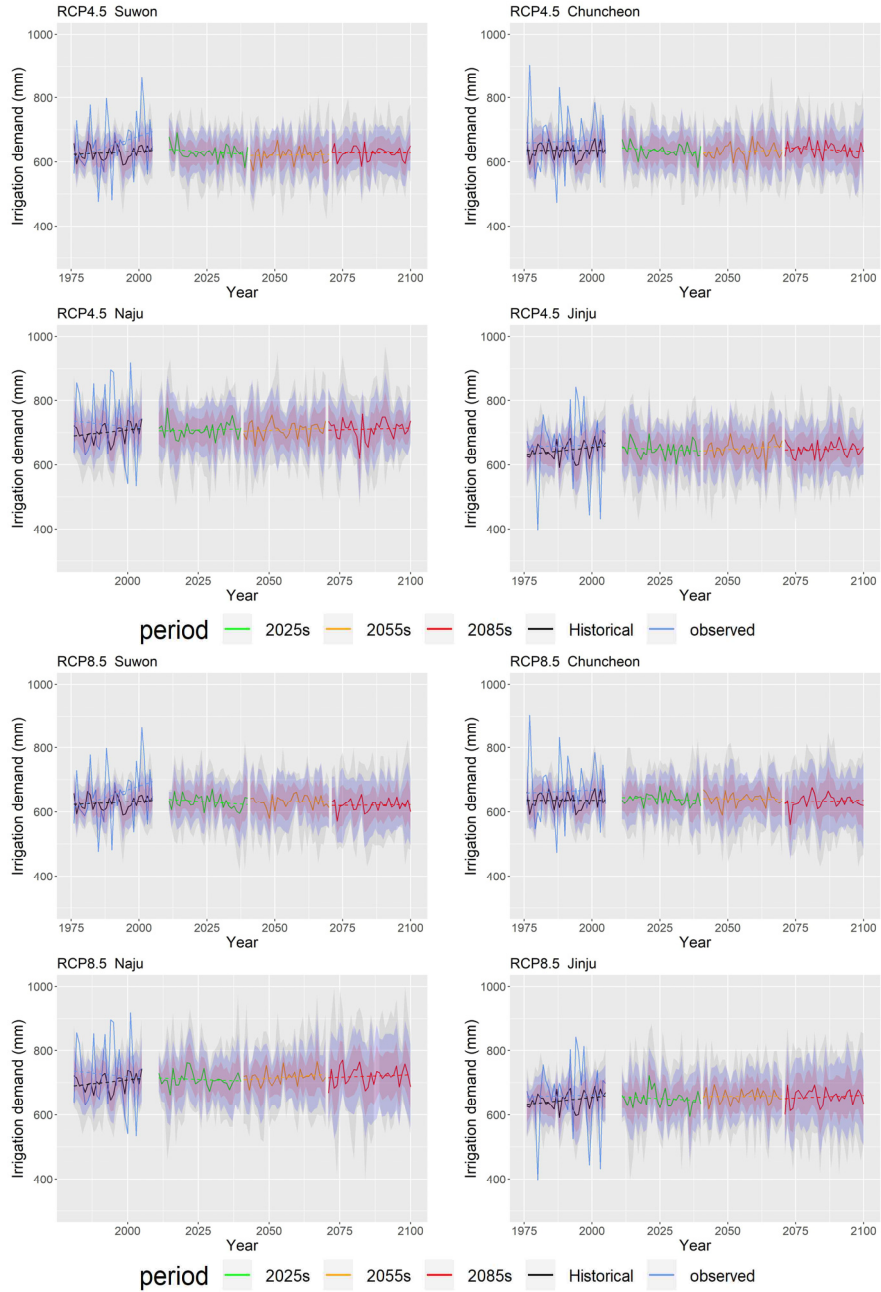


Fig. 4.17 The evaluation result of the climate change impact on rice paddy irrigation demand. 90%(purple), 99%(blue) confidence intervals and range of Max., Min. values(grey) are shown in the graph

나. 월간 변동평가 결과

는 증발산량의 월간 변동을 시각화한 결과는 Fig. 4.18~4.21과 같다. 과거기준기간 (1976~2005)의 기후 재현자료를 이용한 월별 모의결과와 기상 관측 값을 이용한 월별 모의결과 (점선)가 매우 유사한 것으로 나타났다 (Fig. 4.18). 이는 월 기상관측자료의 통계값을 이용하여 GCM 편의보정이 이루어졌기 때문이다.

기후변화에 따라 6, 7월의 증발산량이 증가하고 9월의 증발산량은 감소하는 것으로 예측되었다 (Fig. 4.19~21). 이러한 변화는 기온의 증가가 상대적으로 높은 RCP 8.5 시나리오에서 큰 것으로 나타났다.

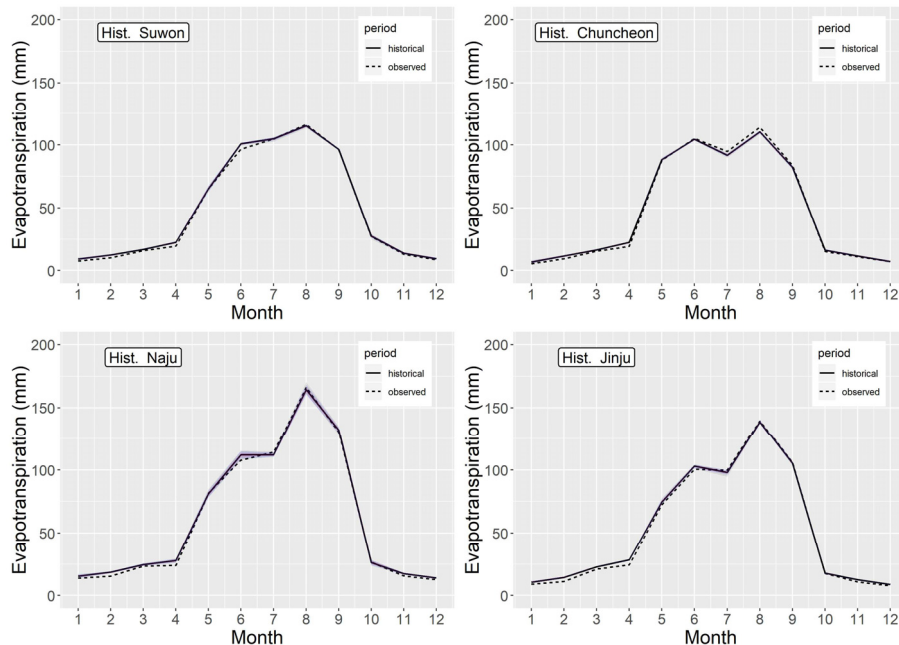


Fig. 4.18 Monthly evapotranspiration changes (historical period). 90%(purple), 99%(blue) confidence intervals and range of Max., Min. values(grey) are shown in the graph

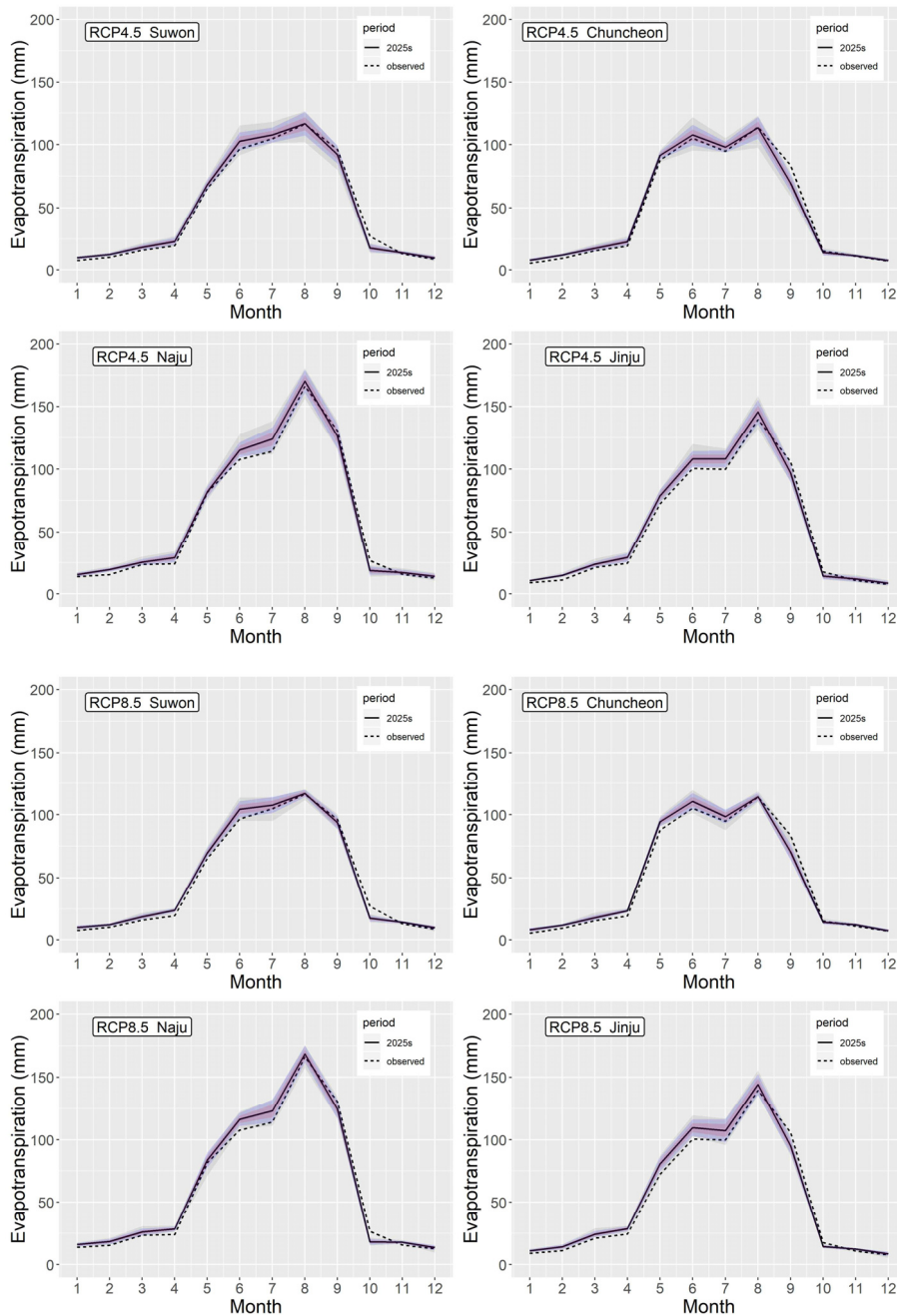


Fig. 4.19 Monthly evapotranspiration changes (2025s period).
90%(purple), 99%(blue) confidence intervals and range of Max., Min.
values(grey) are shown in the graph

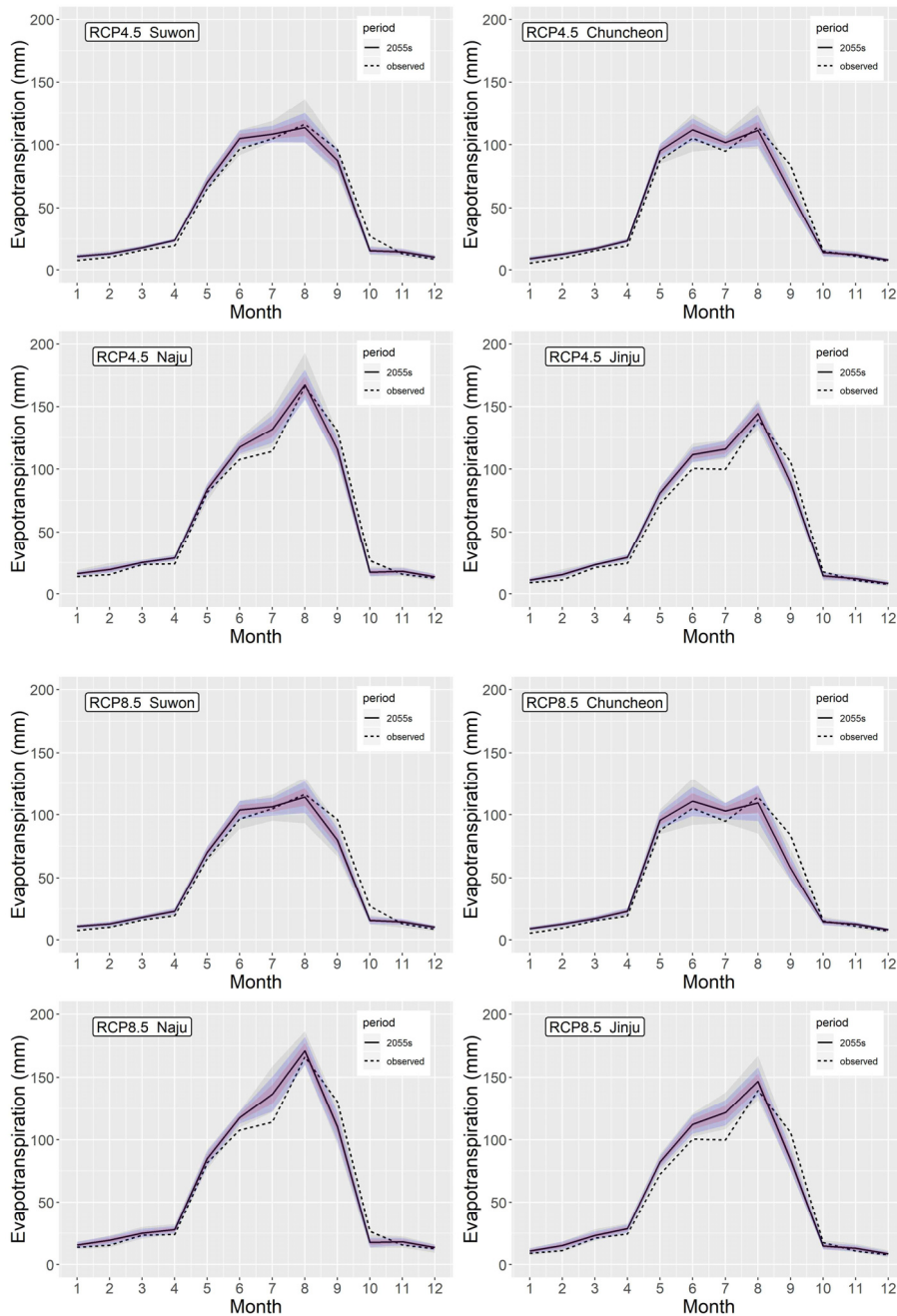


Fig. 4.20 Monthly evapotranspiration changes (2055s period).
90%(purple), 99%(blue) confidence intervals and range of Max., Min.
values(grey) are shown in the graph

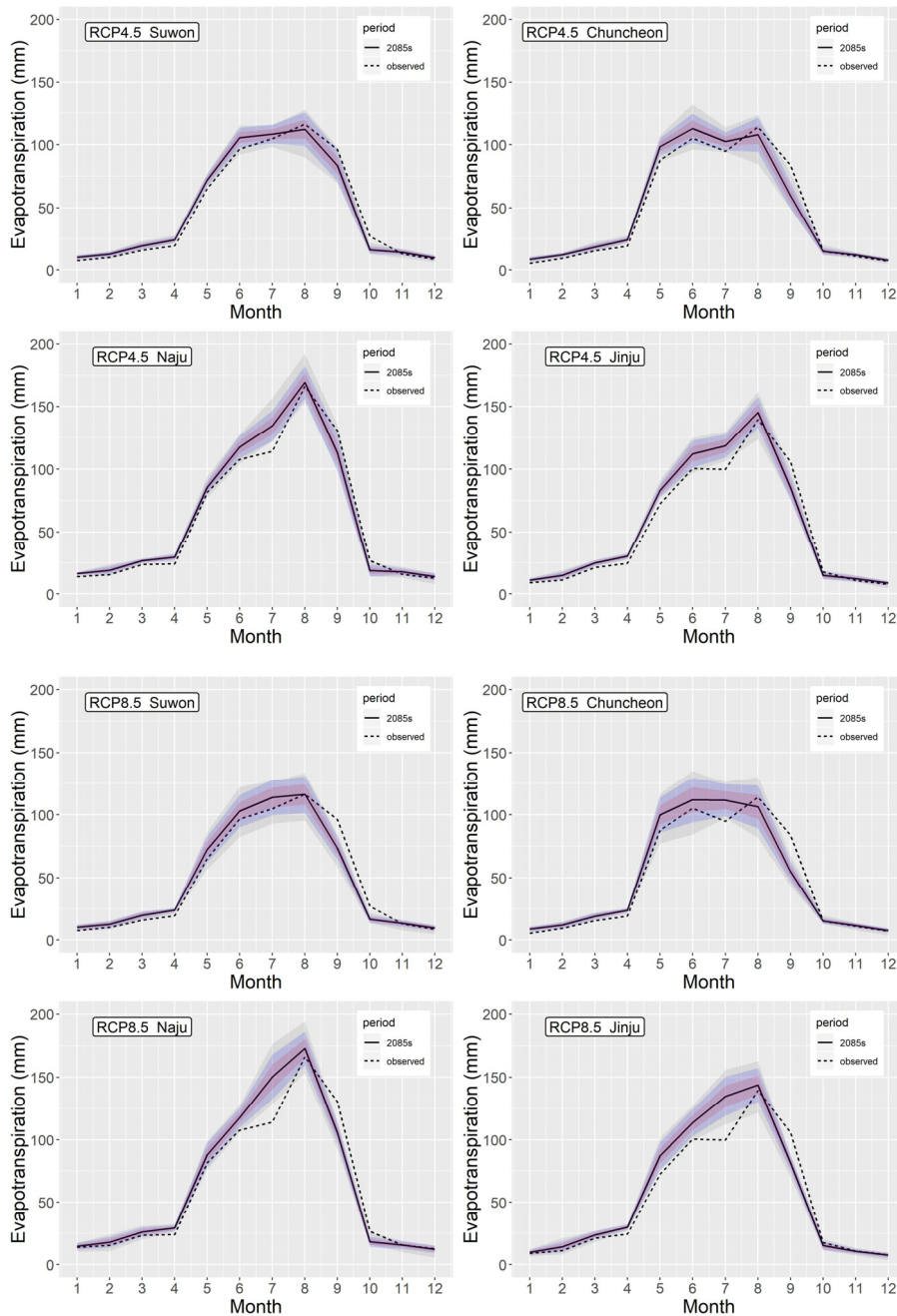


Fig. 4.21 Monthly evapotranspiration changes (2085s period).
90%(purple), 99%(blue) confidence intervals and range of Max., Min.
values(grey) are shown in the graph

6, 7월 증발산량이 상승하고 9월 증발산량이 줄어드는 원인은 논벼 생육기간 단축이 원인으로 판단된다. 기온이 상승하면 식물이 생육종료에 도달하는데 필요한 온도인 잠재열단위 (PHU, Potential Heat Unit)를 빠르게 채우게 된다 (Eq. A.6) (Choi *et al.*, 2017b). 따라서 논벼는 빠른 기간 내에 성숙에 도달하므로 (Fig. 4.22~23) 6, 7월 증발산량이 증가한 것으로 판단된다. 한편, 9, 10월의 증발산량이 기준년도보다 감소하는 원인은 엽면적의 감소시기가 앞당겨지기 때문이다. PHU의 80%를 채운 이후부터 광합성을 하는 엽면적 (Green LAI)이 감소함에 따라 (Fig. 4.22~23) 증산량이 감소하며 (Eq. A.7) PHU를 모두 채우면 작물은 더 이상 증산을 하지 않는다.

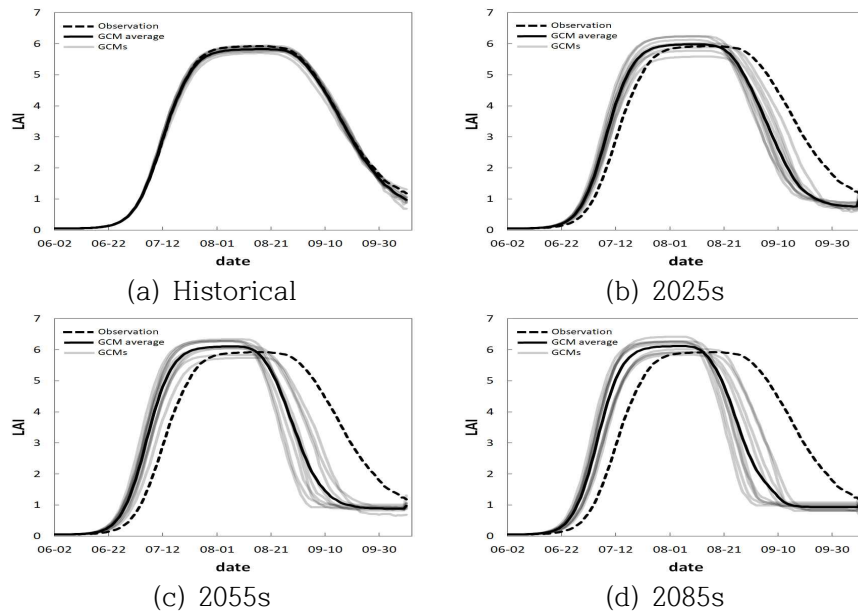


Fig. 4.22 LAI development of rice under RCP4.5 scenario

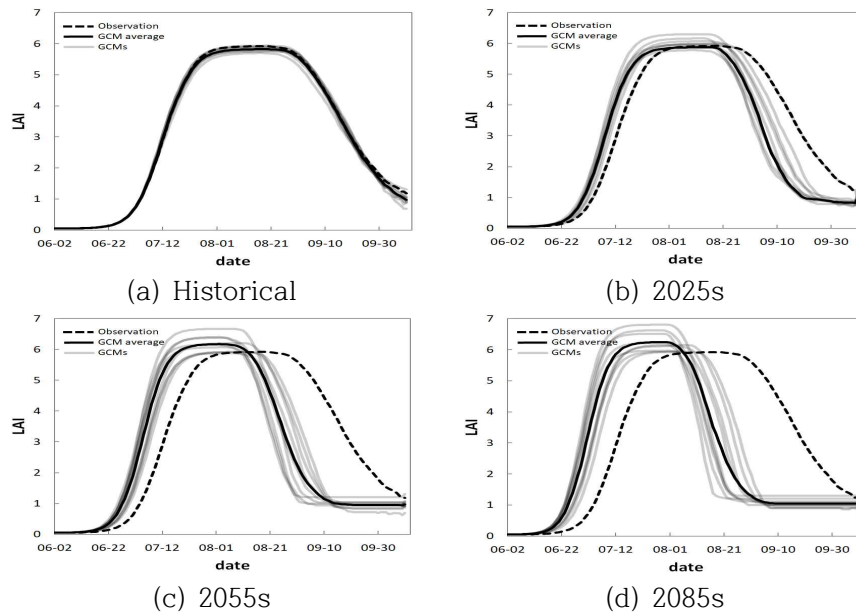


Fig. 4.23 LAI development of rice under RCP8.5 scenario

는 필요수량의 월간 변동을 시각화한 결과는 Fig. 4.24~4.27와 같다. 과거기준기간의 기후 재현자료를 이용한 월별 모의결과와 기상관측 값을 이용한 월별 모의결과 (점선)가 매우 유사한 것으로 나타났다 (Fig. 4.24).

5월의 논 필요수량이 높고 기후변화에 따른 변화가 크지 않은 이유는 썩레질 용수량이 원인이다. 썩레질 용수량은 썩레질 전 논 토층이 완전히 포화되도록 관개하는데 필요한 관개량으로서 토성과 토양수분함량에 영향을 받는다. 특히 춘천의 5월 논 필요수량이 높는데 이는 5월 11일 부터 썩레질 용수를 공급하여 논이 5월의 대부분을 담수상태를 유지하기 때문이다 (Table 4.1). 논이 담수상태로 전환되면 토양증발이 수면증발로 전환되기 때문에 증발산량이 대폭 증가하게 된다.

기후변화에 따른 논 필요수량의 MME 평균값의 월별 변화는 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 특히 8월의 논 필요수량의 불확실성 크기가 상당히 증가하였는데 이는 생육기간 단축에 따른 증산량의 변화, 강수량의 변화 등의 복합적인 요인이 작용하였기 때문이다. 기온, 일사량 추정의 불확실성 증가 (Fig. 3.11)로 인한 논벼 생육, 논 증발산량 예측의 불확실성과 함께 강수량 추정의 불확실성 증가 (Fig. 3.13)로 인하여 먼 미래로 갈수록 논 필요수량 예측의 불확실성이 증가한 것으로 판단된다.

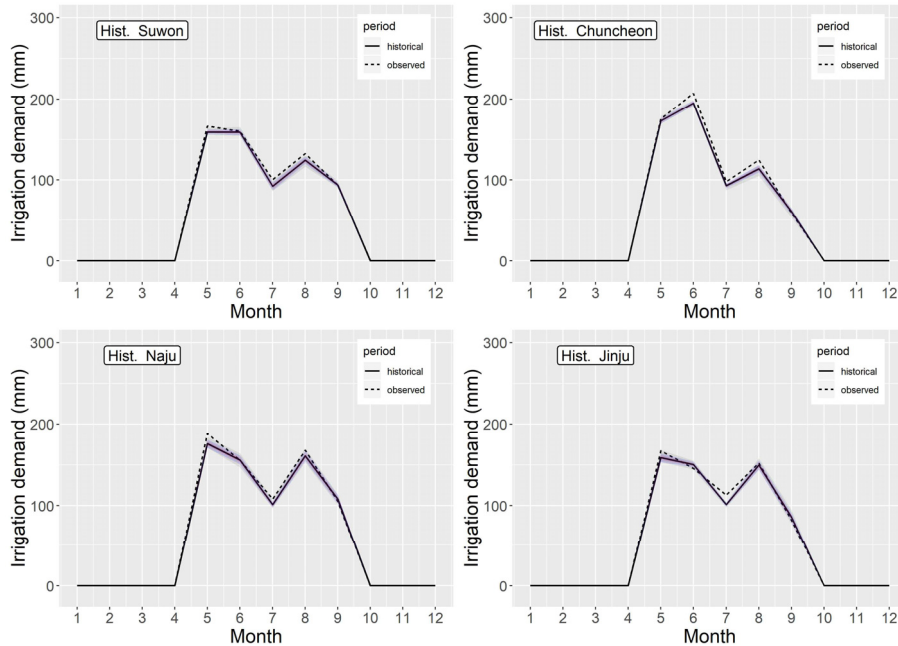


Fig. 4.24 Monthly changes of rice paddy irrigation demand (historical period). 90%(purple), 99%(blue) confidence intervals and range of Max., Min. values(grey) are shown in the graph

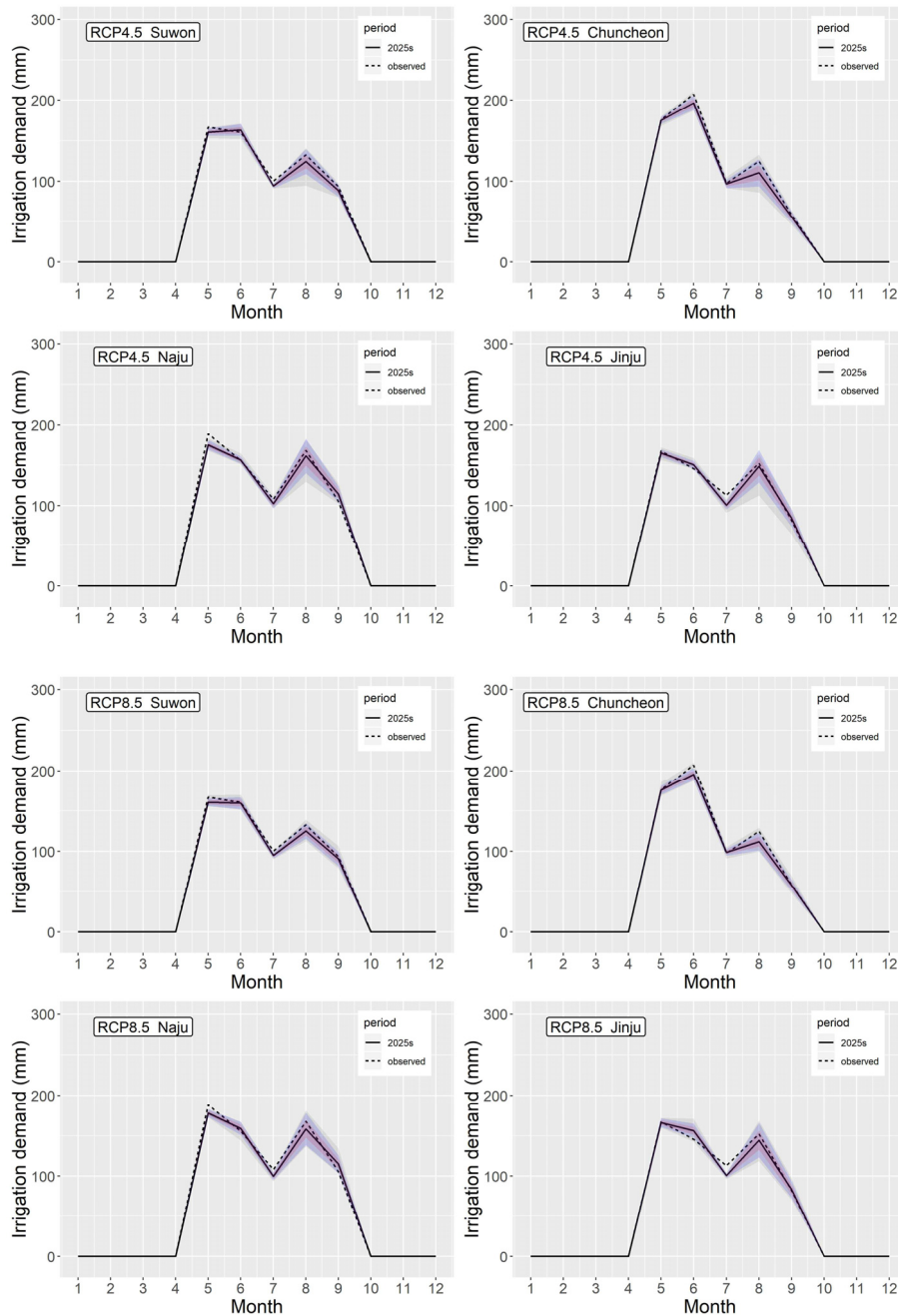


Fig. 4.25 Monthly changes of rice paddy irrigation demand (2025s period). 90%(purple), 99%(blue) confidence intervals and range of Max., Min. values(grey) are shown in the graph

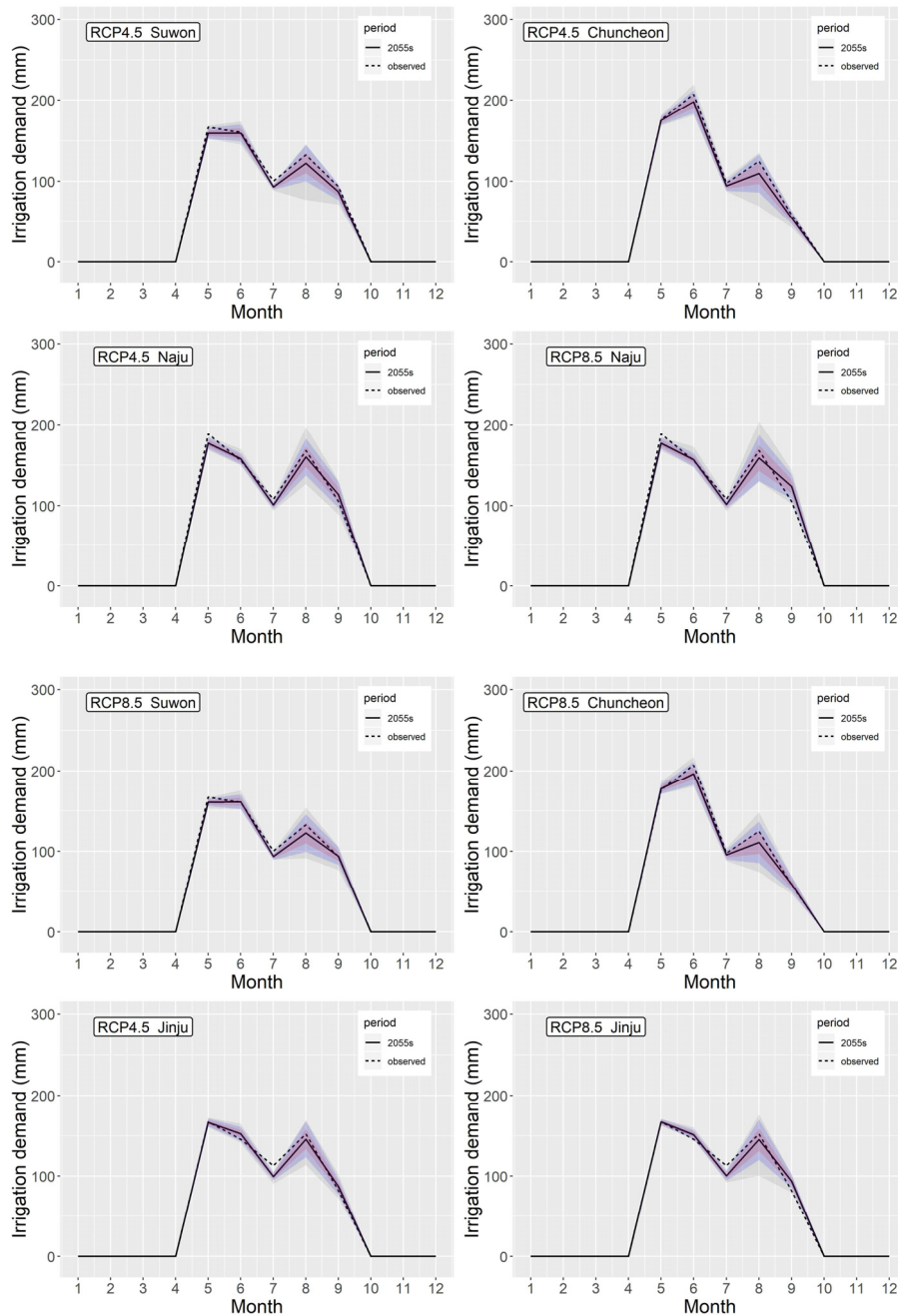


Fig. 4.26 Monthly changes of rice paddy irrigation demand (2055s period). 90%(purple), 99%(blue) confidence intervals and range of Max., Min. values(grey) are shown in the graph

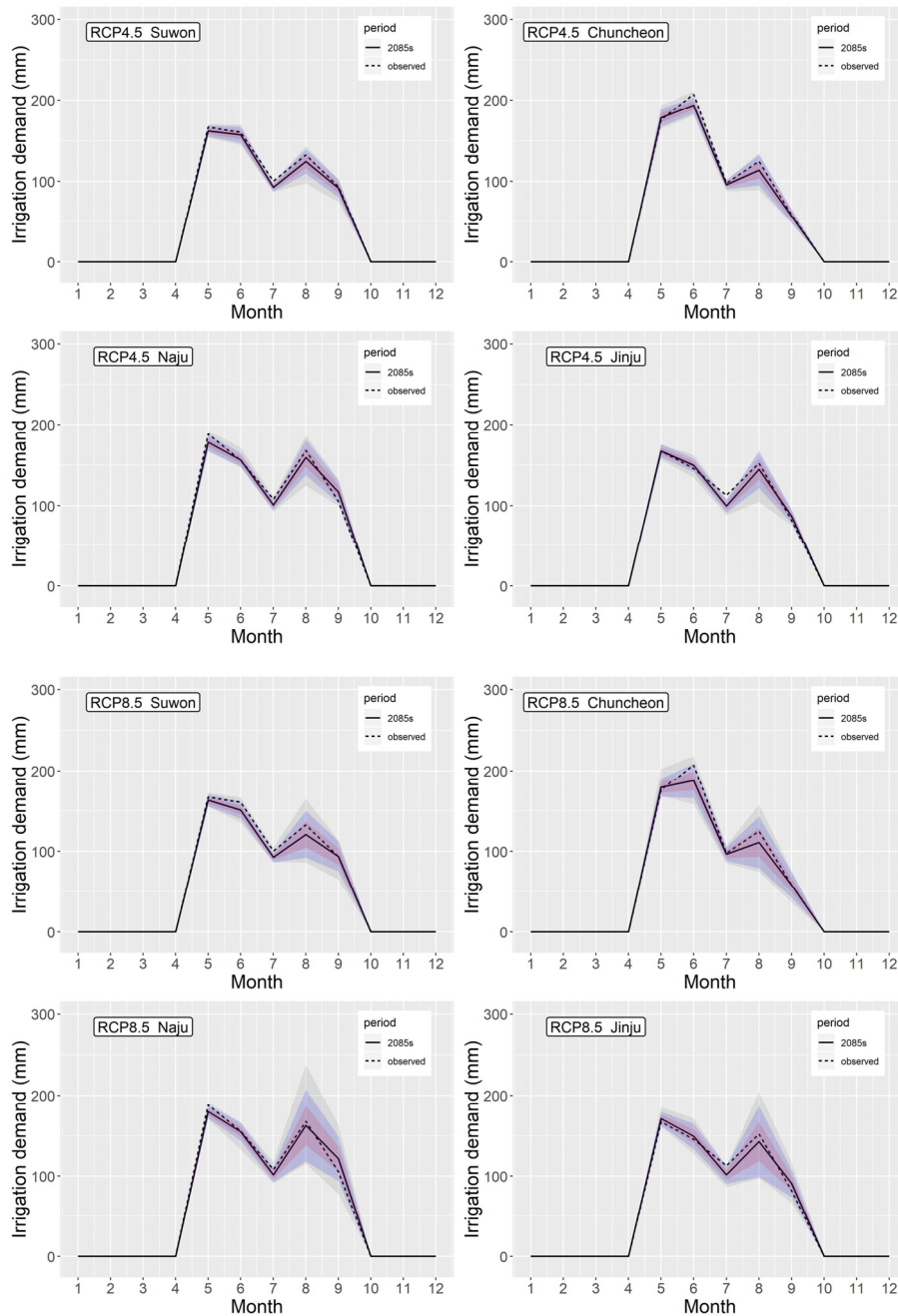


Fig. 4.27 Monthly changes of rice paddy irrigation demand (2085s period). 90%(purple), 99%(blue) confidence intervals and range of Max., Min. values(grey) are shown in the graph

4.3.2 기후변화에 따른 논벼 생산량 변동 평가

논벼 생산량 (조곡 건중량)은 RCP4.5, 8.5 시나리오 모두 모든 지역에서 감소하는 경향을 보였으며 RCP8.5 시나리오가 RCP4.5시나리오에 비하여 감소폭이 큰 것으로 나타났다 (Table 4.10, Fig. 4.28).

중서부 평야인 수원지역의 경우 RCP4.5 시나리오에 대하여 논벼 생산량이 과거기준기간 5.74 ton/ha 대비 2025년대 5.29 ton/ha, 2055년대 4.79 ton/ha, 2085년대 4.51 ton/ha로 각각 7.9%, 16.6%, 21.5%가 감소하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오의 경우 2025년대 5.26 ton/ha, 2055년대 4.45 ton/ha mm, 2085년대 3.95 ton/ha로 각각 8.3%, 22.5%, 31.2%가 감소하는 것으로 나타났다.

중부 내륙인 춘천의 경우 RCP4.5 시나리오에 대하여 논벼 생산량이 과거기준기간 5.70 ton/ha 대비 2025년대 5.32 ton/ha, 2055년대 4.88 ton/ha, 2085년대 4.56 ton/ha로 각각 6.7%, 14.4%, 19.9%가 감소하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오의 경우 2025년대 5.29 ton/ha , 2055년대 4.54 ton/ha, 2085년대 4.13 ton/ha로 각각 7.2%, 20.3%, 27.4%가 감소하는 것으로 나타났다.

남부 호남평야인 나주지역의 경우 RCP4.5 시나리오에 대하여 논벼 생산량이 과거기준기간 5.82 ton/ha 대비 2025년대 5.42 ton/ha, 2055년대 4.81 ton/ha, 2085년대 4.58 ton/ha로 각각 6.8%, 17.4%, 21.3%가 감소하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오의 경우 2025년대 5.21 ton/ha, 2055년대 4.61 ton/ha, 2085년대 4.03 ton/ha로 각각 9.6%, 20.0%, 30.0%가 감소하는 것으로 나타났다.

남부 해안인 진주지역의 경우 RCP4.5 시나리오에 대하여 논벼 생산량이 과거기준기간 5.55 ton/ha 대비 2025년대 5.26 ton/ha, 2055

년대 5.73 ton/ha, 2085년대 4.48 ton/ha로 각각 5.2%, 14.8%, 19.4%가 감소하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오의 경우 2025년대 5.14 ton/ha, 2055년대 4.54 ton/ha, 2085년대 3.92 ton/ha로 각각 7.5%, 18.2%, 29.5%가 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 4.29~30에 따르면 기온상승은 생육초기 작물 바이오매스 증가에 긍정적인 영향을 주나 생육기간 단축과 기온스트레스(Eq A.6, Eq A.12)에 의해 전체 바이오매스 축적량은 적은 것으로 분석되었다. 대기중 이산화탄소의 증가는 복사에너지 사용효율을 높여 생산량에 긍정적인 영향을 주지만(Eq A.2) 기온상승에 따른 생육기간 단축과 기온스트레스에 따른 총 바이오매스 축적량 감소가 생산량 감소에 미치는 영향이 커 결과적으로 총 바이오매스에 영향을 받는 생산량이 크게 감소한 것으로 판단된다.

Table 4.10 Evaluation result for climate change impact on rice yield (dry weight)

Scenario	Period	Suwon			Chuncheon			Naju			Jinju		
		Value	Incre-ment (%)	St.De v.	Value	Incre-ment (%)	St.De v.	Value	Incre-ment (%)	St.De v.	Value	Incre-ment (%)	St.De v.
Historical		5.74	-	0.92	5.70	-	1.00	5.82	-	1.05	5.55	-	1.04
RCP4.5	2025s	5.29	-7.9	1.15	5.32	-6.7	1.18	5.42	-6.8	1.08	5.26	-5.2	1.15
	2055s	4.79	-16.6	1.09	4.88	-14.4	1.21	4.81	-17.4	1.15	4.73	-14.8	1.19
	2085s	4.51	-21.5	1.24	4.56	-19.9	1.33	4.58	-21.3	1.19	4.48	-19.4	1.23
RCP8.5	2025s	5.26	-8.3	0.99	5.29	-7.2	1.10	5.21	-9.6	1.12	5.14	-7.5	1.16
	2055s	4.45	-22.5	1.18	4.54	-20.3	1.30	4.61	-20.0	1.15	4.54	-18.2	1.20
	2085s	3.95	-31.2	1.25	4.13	-27.4	1.35	4.03	-30.0	1.17	3.92	-29.5	1.23

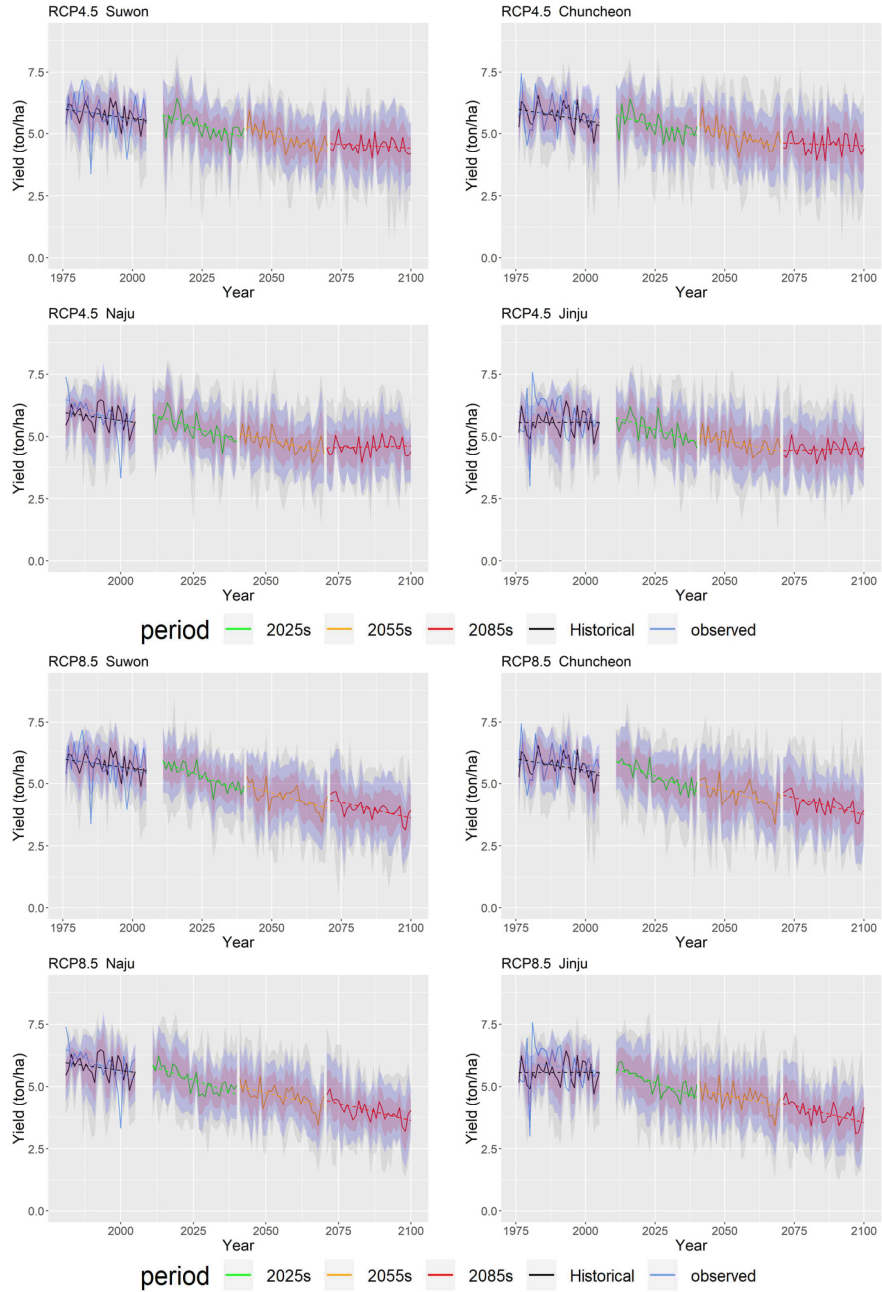


Fig. 4.28 The evaluation result of the climate change impact on rice yield (dry weight). 90%(purple), 99%(blue) confidence intervals and range of Max., Min. values(grey) are shown in the graph

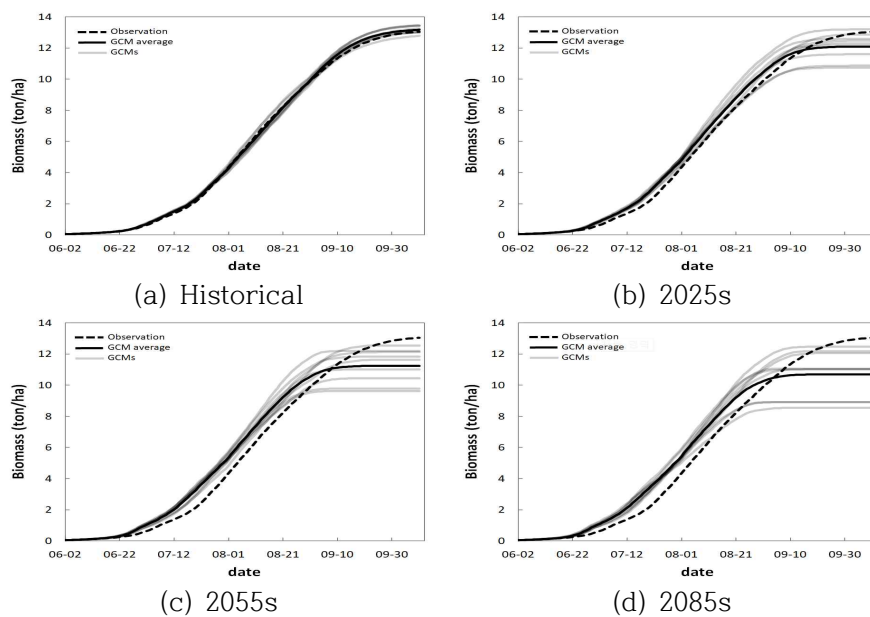


Fig. 4.29 Biomass development of rice under RCP4.5 scenario

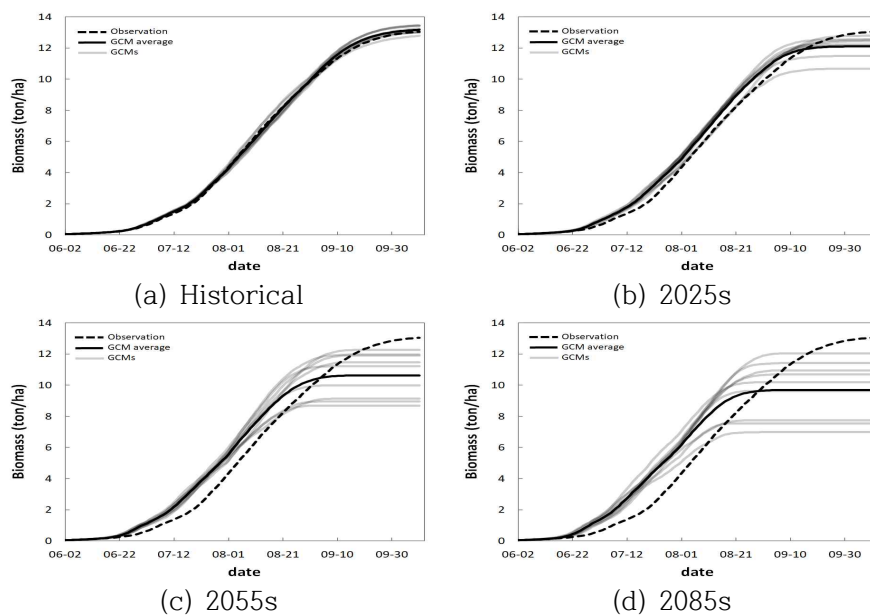


Fig. 4.30 Biomass development of rice under RCP8.5 scenario

4.3.3 기후변화에 따른 논 질소 유출 부하량 변동 평가

가. 연간 변동평가

논 유출량은 RCP4.5, 8.5 시나리오 모두 모든 지역에서 증가하는 경향을 보였으며 강수량 증가가 원인인 것으로 판단된다. 또한, RCP8.5 시나리오가 RCP4.5시나리오에 비하여 증가폭이 큰 것으로 나타났다 (Table 4.11, Fig. 4.31).

중서부 평야인 수원지역의 경우 RCP4.5 시나리오에 대하여 논 유출량이 과거기준기간 721.2 mm 대비 2025년대 817.7 mm, 2055년대 857.8 mm, 2085년대 888.0 mm로 각각 13.4%, 18.9%, 23.1%가 증가하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오의 경우 2025년대 831.2 mm, 2055년대 896.0 mm, 2085년대 1049.0 mm로 각각 15.3%, 24.2%, 45.5%가 증가하는 것으로 나타났다.

중부 내륙인 춘천의 경우 RCP4.5 시나리오에 대하여 논 유출량이 과거기준기간 731.6 mm 대비 2025년대 793.7 mm, 2055년대 863.5 mm, 2085년대 872.3 mm로 각각 8.5%, 18.0%, 19.2%가 증가하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오의 경우 2025년대 820.2 mm, 2055년대 872.9 mm, 2085년대 1030.5 mm로 각각 12.1%, 19.3%, 40.9%가 증가하는 것으로 나타났다.

남부 호남평야인 나주지역의 경우 RCP4.5 시나리오에 대하여 논 유출량이 과거기준기간 763.0 mm 대비 2025년대 875.5 mm, 2055년대 924.2 mm, 2085년대 956.3 mm로 각각 14.7%, 21.1%, 25.3%가 증가하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오의 경우 2025년대 864.9 mm, 2055년대 1006.4 mm, 2085년대 1114.8 mm로 각각 10.8%, 28.9%, 42.8%가 증가하는 것으로 나타났다.

남부 해안인 진주지역의 경우 RCP4.5 시나리오에 대하여 논 유출량이 과거기준기간 903.8 mm 대비 2025년대 970.2 mm, 2055년대 1063.3 mm, 2085년대 1128.5 mm로 각각 7.3%, 17.6%, 24.6%가 증가하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오의 경우 2025년대 998.7 mm, 2055년대 1125.4 mm, 2085년대 1277.7 mm로 각각 10.5%, 24.5%, 41.4%가 증가하는 것으로 나타났다.

논 유출량 증가와 더불어 논 질소 유출 부하량은 RCP4.5, 8.5 시나리오 모두 모든 지역에서 증가하는 경향을 보였다. 또한, RCP8.5 시나리오가 RCP4.5시나리오에 비하여 증가폭이 큰 것으로 나타났다 (Table 4.12, Fig. 4.32).

중서부 평야인 수원지역의 경우 RCP4.5 시나리오에 대하여 논 질소 유출 부하량이 과거기준기간 13.9 kg/ha 대비 2025년대 17.0 kg/ha, 2055년대 18.1 kg/ha, 2085년대 20.1 kg/ha로 각각 21.8%, 29.8%, 43.9%가 증가하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오의 경우 2025년대 15.3 kg/ha, 2055년대 19.6 kg/ha, 2085년대 24.5 kg/ha로 각각 9.7%, 40.4%, 76.0%가 증가하는 것으로 나타났다.

중부 내륙인 춘천의 경우 RCP4.5 시나리오에 대하여 논 질소 유출 부하량이 과거기준기간 14.9 kg/ha 대비 2025년대 15.5 kg/ha, 2055년대 17.4 kg/ha, 2085년대 18.1 kg/ha로 각각 4.6%, 17.1%, 21.5%가 증가하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오의 경우 2025년대 16.4 kg/ha, 2055년대 19.6 kg/ha, 2085년대 23.3 kg/ha로 각각 10.3%, 31.6%, 56.4%가 증가하는 것으로 나타났다.

남부 호남평야인 나주지역의 경우 RCP4.5 시나리오에 대하여 논 질소 유출 부하량이 과거기준기간 15.8 kg/ha 대비 2025년대 17.6 kg/ha, 2055년대 20.7 kg/ha, 2085년대 20.3 kg/ha로 각각 11.1%,

30.7%, 28.4%가 증가하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오의 경우 2025년대 17.2 kg/ha, 2055년대 20.6 kg/ha, 2085년대 24.7 kg/ha로 각각 8.5%, 29.8%, 55.7%가 증가하는 것으로 나타났다.

남부 해안인 진주지역의 경우 RCP4.5 시나리오에 대하여 논 질소 유출 부하량이 과거기준기간 18.7 kg/ha 대비 2025년대 19.7 kg/ha, 2055년대 21.6 kg/ha, 2085년대 21.8 kg/ha로 각각 5.7%, 15.6%, 16.9%가 증가하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오의 경우 2025년대 18.7 kg/ha, 2055년대 23.2 kg/ha, 2085년대 28.2 kg/ha로 각각 0.0%, 24.2%, 51.1%가 증가하는 것으로 나타났다.

RCP4.5 시나리오의 경우 과거기준년도 대비 2085년대 유출량이 19.2%~25.3% 증가하는데 비하여 질소 유출 부하량은 21.5%~43.9%가 증가하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오의 경우 유출량이 40.9%~45.5% 증가하는데 비하여 질소 유출 부하량은 51.1%~76.0%가 증가하는 것으로 나타나 질소 유출 부하량의 변동이 유출량 변동보다 큰 것으로 나타났다.

Table 4.11 Evaluation result for climate change impact on paddy runoff

Scenario	Period	Suwon			Chuncheon			Naju			Jinju		
		Value	Increment (%)	St.Dev.	Value	Increment (%)	St.Dev.	Value	Increment (%)	St.Dev.	Value	Increment (%)	St.Dev.
Historical		721.2	–	284.5	731.6	–	281.8	763.0	–	282.9	903.8	–	315.8
RCP4.5	2025s	817.7	13.4	303.2	793.7	8.5	278.6	875.5	14.7	338.6	970.2	7.3	340.5
	2055s	857.8	18.9	315.7	863.5	18.0	334.9	924.2	21.1	344.9	1063.3	17.6	344.7
	2085s	888.0	23.1	348.7	872.3	19.2	354.4	956.3	25.3	361.1	1126.5	24.6	383.4
RCP8.5	2025s	831.2	15.3	339.9	820.2	12.1	323.9	864.9	10.8	340.7	998.7	10.5	372.0
	2055s	896.0	24.2	356.8	872.9	19.3	360.8	1006.4	28.9	374.8	1125.4	24.5	382.5
	2085s	1049.0	45.5	395.3	1030.5	40.9	423.3	1114.8	42.8	462.5	1277.7	41.4	487.5

Table 4.12 Evaluation result for climate change impact on mineral nitrogen yield from paddy

Scenario	Period	Suwon			Chuncheon			Naju			Jinju		
		Value	Increment (%)	St.Dev.	Value	Increment (%)	St.Dev.	Value	Increment (%)	St.Dev.	Value	Increment (%)	St.Dev.
Historical		13.9	–	7.4	14.9	–	8.1	15.8	–	7.1	18.7	–	8.1
RCP4.5	2025s	17.0	21.8	8.3	15.5	4.6	7.8	17.6	11.1	8.1	19.7	5.7	8.7
	2055s	18.1	29.8	8.0	17.4	17.1	8.3	20.7	30.7	8.7	21.6	15.6	9.2
	2085s	20.1	43.9	8.3	18.1	21.5	8.7	20.3	28.4	6.9	21.8	16.9	8.0
RCP8.5	2025s	15.3	9.7	7.4	16.4	10.3	8.6	17.2	8.5	7.4	18.7	0.0	7.2
	2055s	19.6	40.4	8.1	19.6	31.6	8.9	20.6	29.8	8.4	23.2	24.2	8.8
	2085s	24.5	76.0	9.6	23.3	56.4	9.4	24.7	55.7	9.6	28.2	51.1	10.7

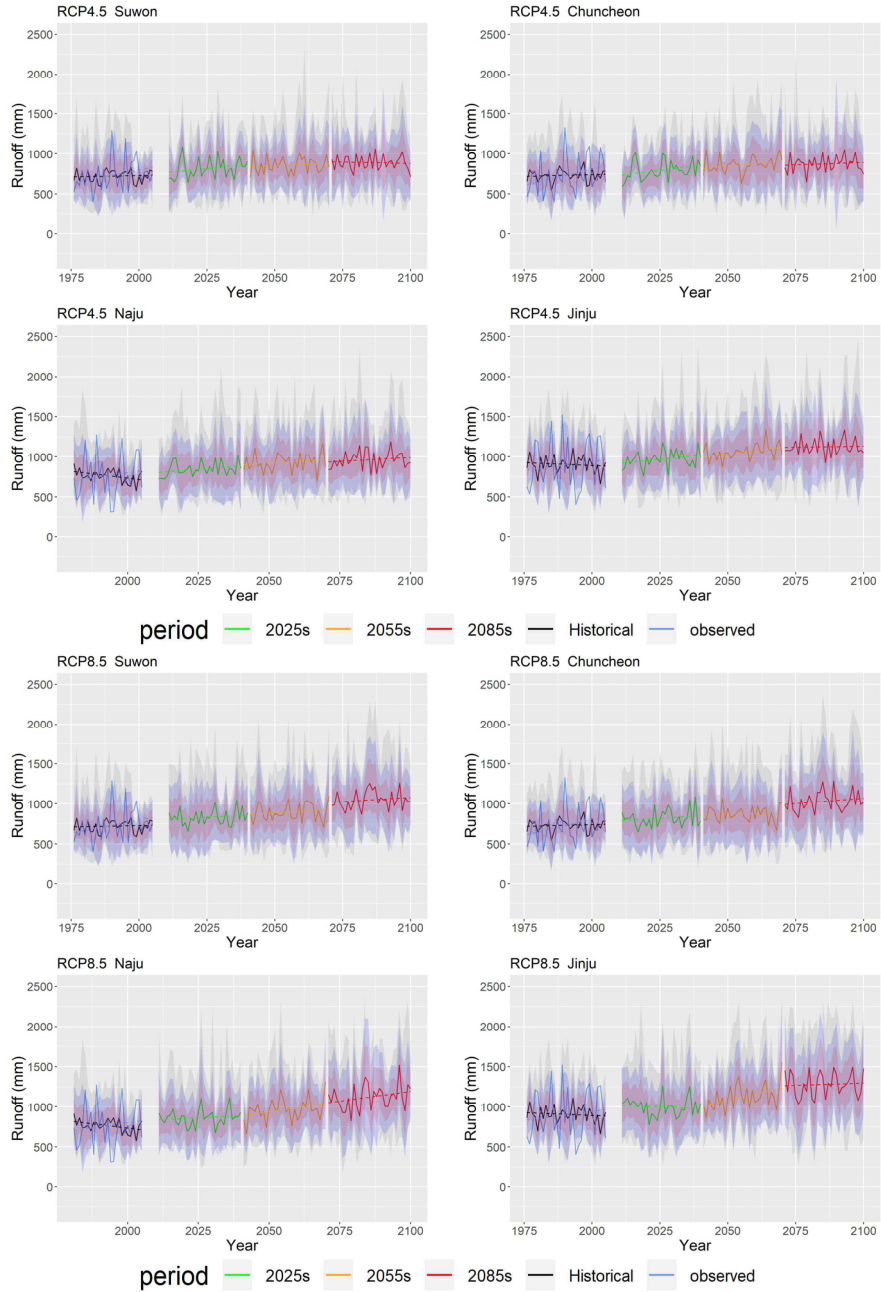


Fig. 4.31 The evaluation result of the climate change impact on paddy runoff. 90%(purple), 99%(blue) confidence intervals and range of Max., Min. values(grey) are shown in the graph

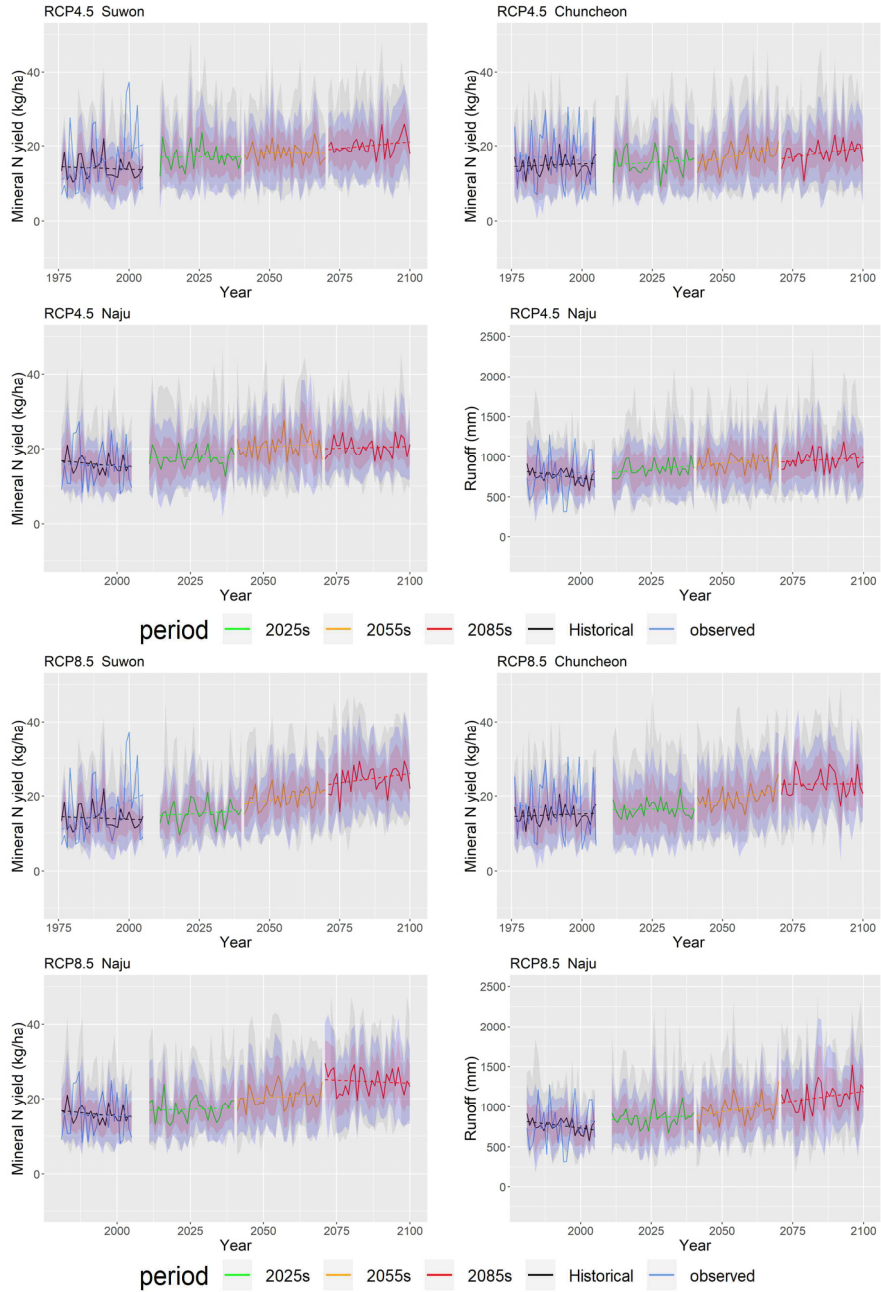


Fig. 4.32 The evaluation result of the climate change impact on mineral nitrogen yield. 90%(purple), 99%(blue) confidence intervals and range of Max., Min. values(grey) are shown in the graph

나. 월간 변동평가

논 유출량의 월간 변동을 시각화한 결과는 Fig. 4.33~4.36와 같다. 모든 지역에서 7월의 유출량이 가장 큰 것으로 나타났으며 과거기 준기간의 기후 재현자료를 이용한 월별 모의결과와 기상 관측 값을 이용한 월별 모의결과 (점선)가 매우 유사하였다 (Fig. 4.33).

기후변화에 따른 강수량 증가로 인하여 모든 개월에 대하여 유출량이 전반적으로 증가하는 것으로 나타났으며 월간 변화의 정도는 지역별로 약간의 차이를 보였다. RCP8.5 시나리오가 RCP4.5 시나리오에 비하여 큰 변화를 보였으며 2085년대로 갈수록 예측의 불확실성이 증가하였다.

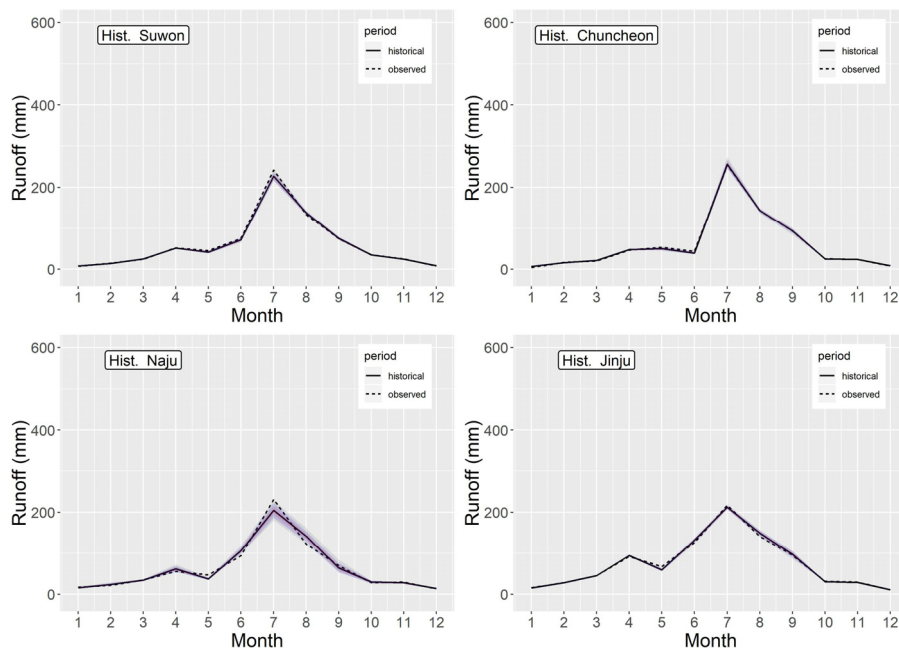


Fig. 4.33 Monthly changes of paddy runoff (historical period).
90% (purple), 99% (blue) confidence intervals and range of Max.,
Min. values (grey) are shown in the graph

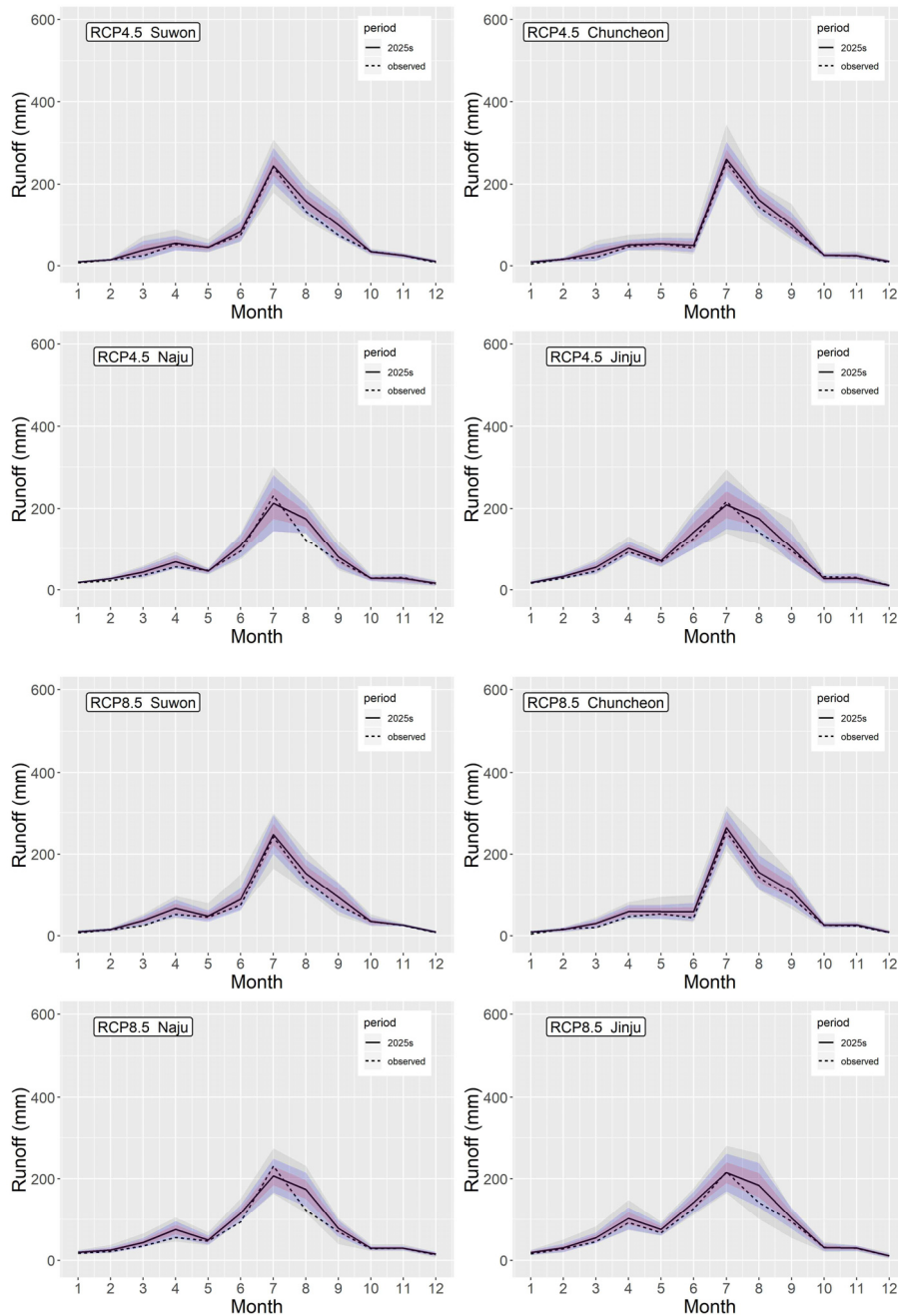


Fig. 4.34 Monthly changes of paddy runoff (2025s period). 90% (purple), 99% (blue) confidence intervals and range of Max., Min. values (grey) are shown in the graph

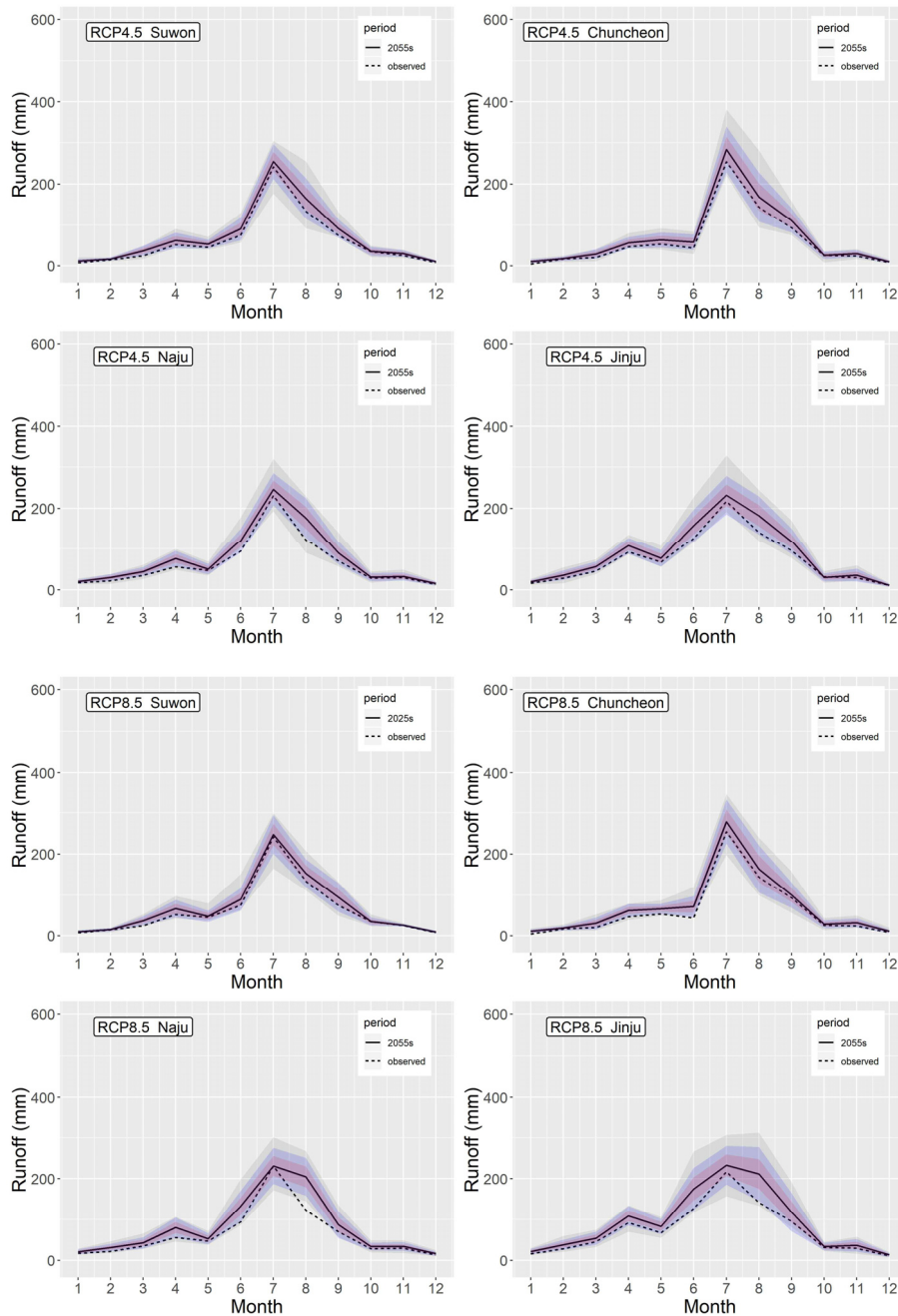


Fig. 4.35 Monthly changes of paddy runoff (2055s period). 90% (purple), 99% (blue) confidence intervals and range of Max., Min. values (grey) are shown in the graph

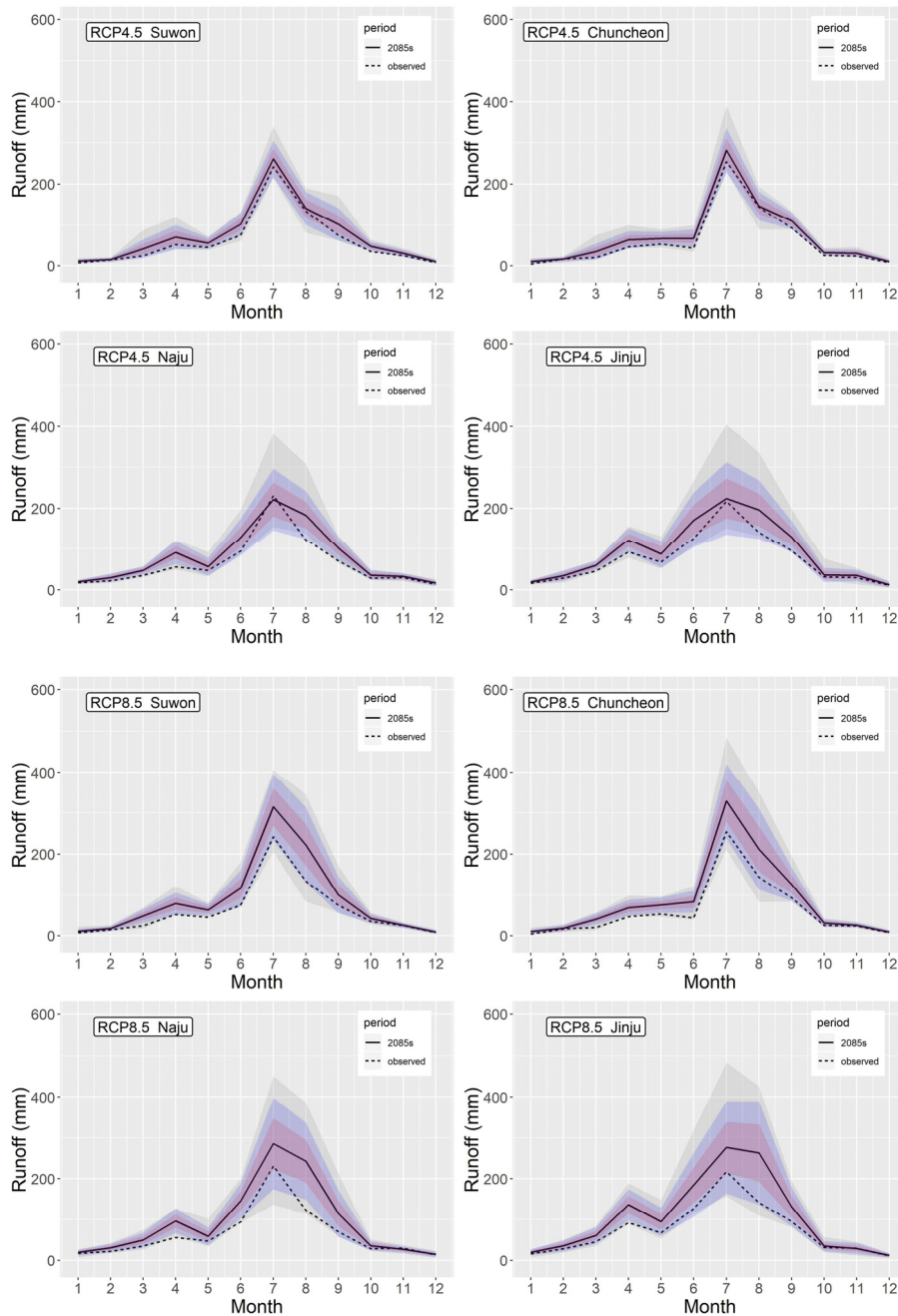


Fig. 4.36 Monthly changes of paddy runoff (2085s period). 90% (purple), 99% (blue) confidence intervals and range of Max., Min. values (grey) are shown in the graph

논 질소 유출 부하량의 월간 변동을 시각화한 결과는 Fig. 4.37~4.40과 같다. 논 질소는 질소비료 시비량의 50%가 시비되는 5월과 30%가 시비되고 유출량이 많은 7월에 부하가 큰 것으로 나타났다. 8월의 경우 유출량에 비하여 질소 유출 부하량이 크지 않았는데 이는 분얼비가 시비되는 7월 이후 질소의 이동과 유출, 휘산, 탈질 등에 따라 논 물의 질소 농도가 많이 낮아졌기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 과거기준기간의 기후 재현자료를 이용한 월별 모의결과와 기상 관측 값을 이용한 월별 모의결과 (점선)가 7월의 경우 지역별로 차이가 나타났으며 (수원, 춘천, 진주) 논 필요수량, 논벼 생산량에 비하여 GCM 간 예측결과의 차이를 보였다 (Fig. 4.37). 월간 질소 유출 부하량이 다양한 기후인자와 작물 생육에 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.

질소 유출 부하량 변동이 유출량 변동보다 큰 원인은 월간 질소 유출 부하량 변동을 통해 평가할 수 있다. 논 질소 유출 부하량은 논 유출량 증가에 따라 증가하는 경향을 보였는데 특히 생육 후기인 9월의 논 질소 유출 부하량이 크게 증가하는 경향을 보였다. 이는 기온상승으로 인해 생육기간이 단축되었고, 생육기간 단축 및 고온스트레스로 인하여 생장이 둔화되어 작물이 토양중의 질소를 충분히 소진하지 못했기 때문이다. 따라서 벼 수확을 위한 낙수 시 논물 중에 잔류하는 다량의 질소가 유출된 것으로 판단된다.

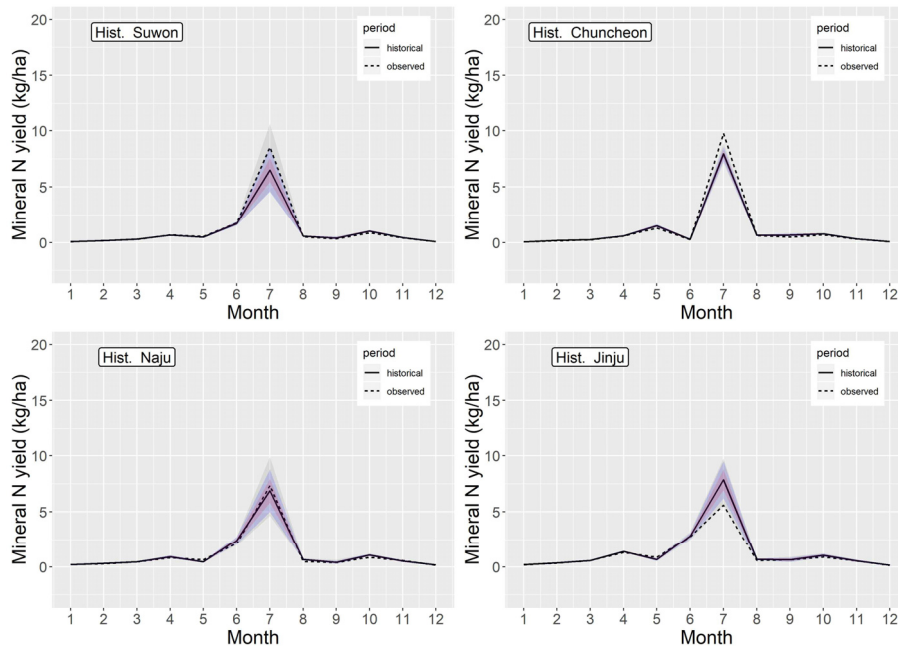


Fig. 4.37 Monthly changes of paddy mineral nitrogen yield (historical period). 90% (purple), 99% (blue) confidence intervals and range of Max., Min. values (grey) are shown in the graph

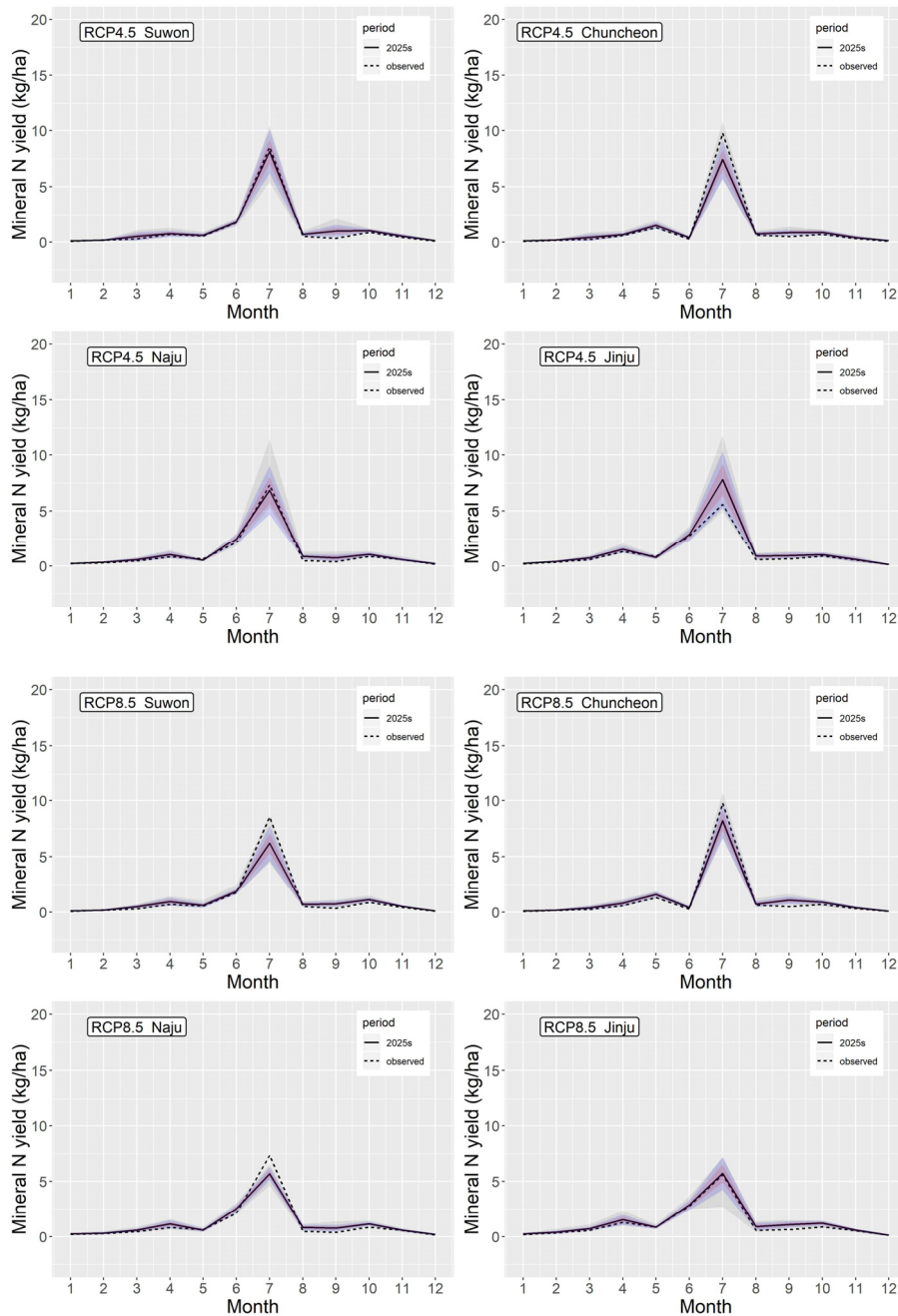


Fig. 4.38 Monthly changes of paddy mineral nitrogen yield (2025s period). 90% (purple), 99% (blue) confidence intervals and range of Max., Min. values (grey) are shown in the graph

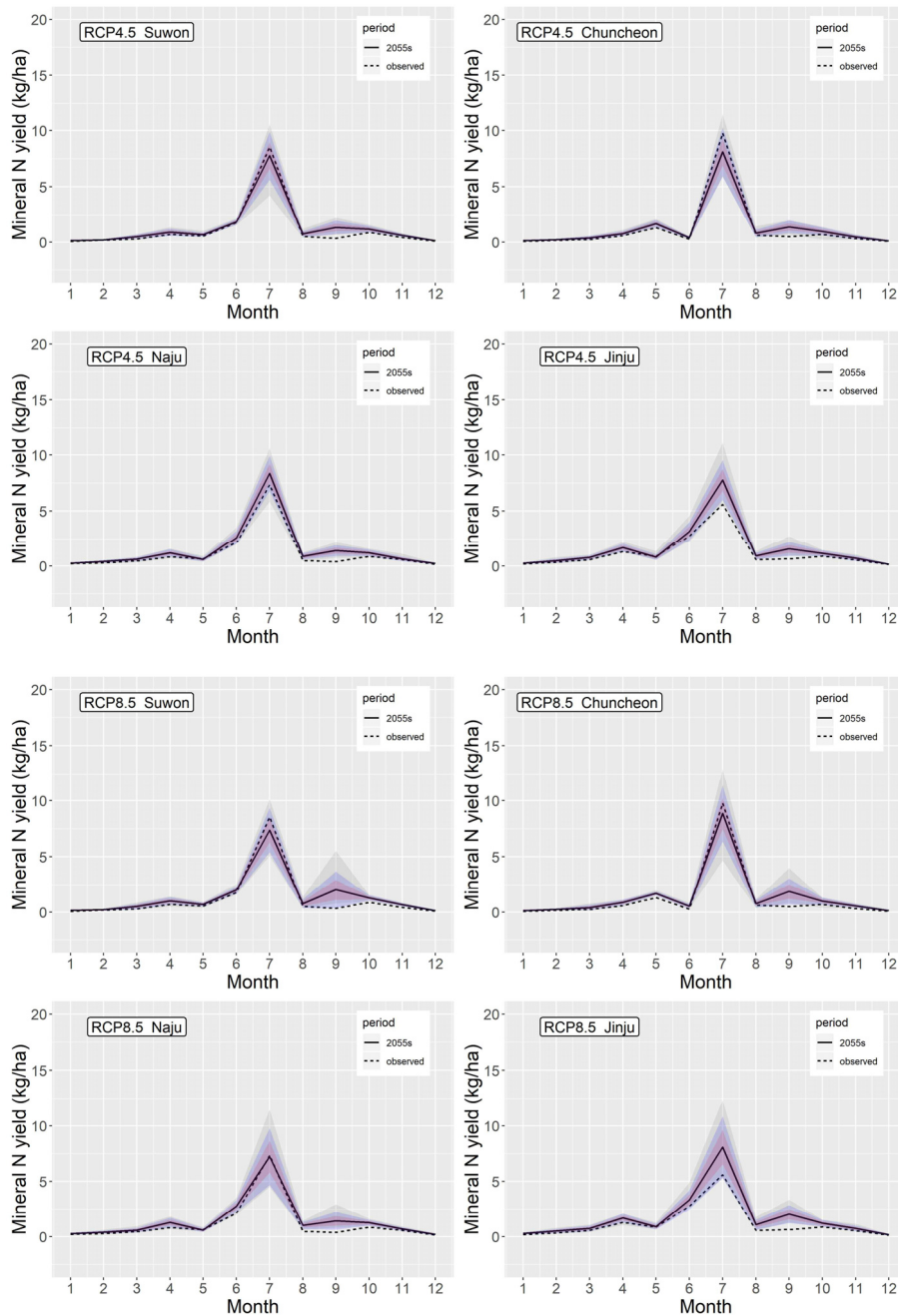


Fig. 4.39 Monthly changes of paddy mineral nitrogen yield (2055s period). 90% (purple), 99% (blue) confidence intervals and range of Max., Min. values (grey) are shown in the graph

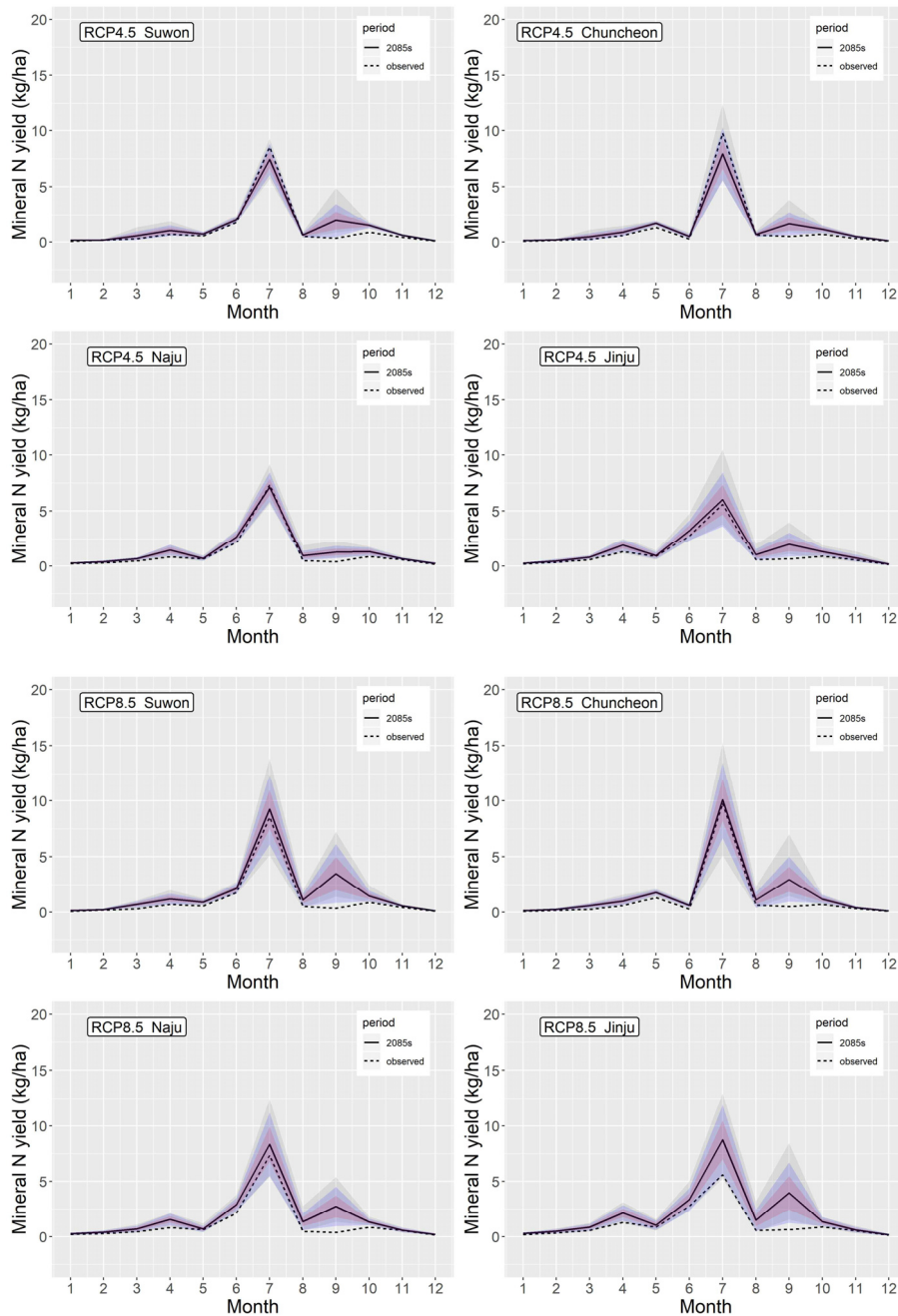


Fig. 4.40 Monthly changes of paddy mineral nitrogen yield (2085s period). 90% (purple), 99% (blue) confidence intervals and range of Max., Min. values (grey) are shown in the graph

제 5 장 요약 및 결론

본 연구에서는 논 재배환경을 고려하여 APEX-Paddy 모형을 개발하고, 기후변화가 논벼 재배의 생산성 및 필요수량, 양분유출량에 미치는 영향을 종합적으로 평가하고자 하였다.

농경지 수문순환 및 환경영향 평가에 관한 다양한 필지단위, 유역 단위 모형이 활용되고 있으나 대부분의 모형은 재배관리 효과를 반영하지 못하였다. 본 연구에서는 경운, 파종, 물관리, 양분관리 등 세부적인 농경지 관리 모의가 가능하며 비점오염 저감기술 효과를 분석할 수 있는 APEX 모형을 대상으로 논 재배환경을 모의하기 위하여 APEX 모형 내 논 모듈을 추가하여 APEX-Paddy 모형을 개발하였다.

개발된 모형의 적용성 평가를 위하여 이천 시험포장의 유입·유출량 및 양분유출 측정 자료 (2003~2004)와 김제 시험포장의 유입·유출량 (2014) 및 증발산량 측정 자료 (2015~2017)를 이용하여 APEX-Paddy 모형을 보·검정 하였다.

기후변화 영향평가를 위한 연구대상지역은 농업 기후지대 구분과 농업활동 관련 정보의 유무, 인근 종관기상관측소 관측자료의 양과 질을 고려하여 수원, 춘천, 나주, 진주 4개 지역으로 선정하였다. APEC기후센터의 AIMS 모형을 이용하여 기후변화 시나리오 9개 GCMs에 대한 편의보정을 수행하였다. 보정된 기후자료 및 APEX-Paddy 모형 적용 결과에 대한 재현성을 평가하고 기후인자에 대한 상관성을 분석하였다. 증발산량, 필요수량, 질소유출량, 조곡 바이오매스 생산량 등에 대한 연간 변화와 월간 변화를 정량화 하고 변화의 원인을 분석하였다.

본 연구의 결과는 다음과 같다.

증발산량에 대한 APEX-Paddy 보·검정을 위하여 토양증발을 제어하는 매개변수와 논 담수 시 수면증발에 관한 매개변수를 보정한 결과 Penman-Monteith 식의 경우 보정기간 (2015~2016)에 대하여 R^2 가 0.77, 검정기간 (2017)에 대하여 R^2 가 0.70으로 모의 결과가 실측값을 잘 반영하는 것으로 나타났다. Hargreaves 식의 경우 보정기간에 대하여 R^2 가 0.52, 검정기간에 대하여 R^2 가 0.54로 Penman-Monteith 식에 비하여 모의 신뢰도가 떨어졌다.

논 유출량 및 질소유출량에 관한 보정은 2002년 이전 광역논 시험 포장 관측자료를 이용하였으며 검정은 2003년 동일지역의 관측자료와 2014년 김제 필지단위 논 관측자료를 이용하였다. R^2 를 목적함수로 APEX 모형 자동보정 프로그램 (APEX-CUTE)를 이용하여 보정한 결과 보정기간에 대하여 유출량과 질소유출량을 잘 모의하는 것으로 나타났다 (유출량 : $R^2 = 0.88$, NSE = 0.65, PBIAS = 9.6%; 질소 유출량 : $R^2 = 0.66$, NSE = 0.63, PBIAS = 2.1%). 검정기간에 대하여 이전의 경우 유출량 모의결과가 실측값을 대체로 잘 반영하였으나 질소 유출량 모의결과는 만족 (satisfy) 수준으로 평가되었다 (유출량 : $R^2 = 0.80$, NSE = 0.65, PBIAS = 9.6%; 질소 유출량 : $R^2 = 0.64$, NSE = 0.43, PBIAS = 4.5%). 김제의 경우 유출량 모의 결과가 실측값을 잘 반영하는 것으로 나타났다 ($R^2 = 0.77$, NSE = 0.70, PBIAS = 10.82%).

편의보정 된 기후자료 및 APEX-Paddy 모형 적용 결과에 대한 재현성을 평가한 결과 과거 관측자료 및 관측값을 이용한 APEX-Paddy 모형의 결과와 기후시나리오 재현 결과가 유의한 차

이가 없는 것으로 나타났다.

RCP4.5 시나리오와 RCP8.5 시나리오에 대하여 9개 GCMs를 적용하여 다중모형 앙상블을 통해 논 환경의 기후변화 영향을 평가한 결과 논 필요수량은 RCP4.5 시나리오의 경우 2085s (2071~2100) 기간이 과거 기준기간 (1976~2005)과 비교하여 -1.3~1.3%의 변화를 보였으며 RCP8.5 시나리오의 경우 -1.3~2.7%의 변화를 보여 변화가 유의하지 않은 것으로 나타났다. 이는 기후변화에 따라 증발량이 상당히 증가하나 CO₂농도 및 벼 생육기간 단축의 영향으로 증산량이 감소하여 총 증발산량 변화가 크지 않기 때문인 것으로 판단된다.

논벼 생산량은 RCP4.5 시나리오의 경우 2085s 기간이 과거 기간과 비교하여 19.4~21.5% 감소하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오의 경우 29.4~31.2%가 감소하는 것으로 나타나 기온변화가 큰 RCP8.5 시나리오가 RCP4.5 시나리오에 비해 변화 폭이 큰 것으로 산정되었다. 이러한 결과의 원인은 기온상승에 따라 초기에는 작물 바이오매스 증가속도가 빠르나 일찍 성숙에 도달하여 총 바이오매스 축적량이 감소하기 때문이다.

논의 질소 유출 부하량은 RCP4.5 시나리오의 경우 2085s 기간이 과거 기간과 비교하여 16.9~43.9% 증가하는 것으로 나타났으며 RCP8.5 시나리오의 경우 51.1~76.0%가 증가하는 것으로 나타났다. 특히 강수량 증가폭이 큰 수원지역의 질소 유출 부하량 변화가 컸다. 특히 9월의 질소 유출 부하량이 크게 증가하였는데 원인은 기온상승에 따라 벼가 일찍 수확기에 접어들고 총 바이오매스 축적량이 줄어들기 때문에 시비된 질소가 미처 사용되지 못하고 배수되기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 본 연구의 한계점은 다음과 같다.

첫째, 본 연구는 현재와 같은 방식으로 논벼 재배가 이루어졌을 경우를 가정하고 있어 벼 품종 및 재배관리 시기를 고정하여 분석하였다. Yun (2001)은 기후변화 적응을 위하여 적정 파종시기의 결정과 같은 재배시기 조정은 벼 생육의 제한요인을 상당히 완화할 수 있을 것으로 판단하였으며 기후변화의 불확실성을 고려하여 등숙에 알맞은 온도 범위가 넓고 높은 품종을 재배할 필요가 있다고 하였다. 따라서 기후변화에 따라 농업인은 이앙시기를 늦추거나 품종을 중생종에서 만생종으로, 만생종에서 극만생종으로 바꿀 가능성이 크다. 그러나 Lee *et al.* (2011)은 파종기를 조정함으로써 등숙기간의 온도환경을 어느 정도 개선할 수 있으나 출수 전 생육기간이 크게 단축된다면 여전히 벼 수량성 경감에는 한계가 있기 때문에 적극적인 재배기술과 품종개발이 필요하다고 하였다. 또한, Yun (2001)은 광합성이 부진하거나 일교차가 큰 경우도 벼 등숙에 부정적인 영향을 미친다고 보고하였는데 등숙기간을 후기로 이동시킬 경우 가조시간 감소와 큰 일교차로 생산량 감소에 영향을 줄 우려가 있다고 하였다. 따라서 향후 등숙기 온도환경을 고려하여 이앙기를 무한히 뒤로 미루는 것이 능사가 아니므로 기후변화 적응을 위한 재배시기 조정 및 품종 선택을 고려한 연구가 필요하다.

둘째, 벼는 생육단계별로 고온에 취약한 시기가 존재한다. Oryza2000 모형, AquaCrop 모형, CERES-Rice 모형은 작물의 생육을 모의하며 생육단계별 고온스트레스에 따른 가중치를 두는데 APEX 모형의 작물생육 모형은 이들 모형과 비교하여 작물과 잡초간의 경합을 고려한다는 장점이 있으나 출수기, 분얼기, 등수기 등

작물 생육을 모의하지는 않는다. 따라서 고온스트레스는 재배기간에 동일한 가중치로 적용되어 바이오매스 축적량에 영향을 주지만 출수기 고온에 의한 불임 등이 모의되지 않는다는 한계가 있다.

그러나 본 연구는 논 재배환경을 고려하여 논 의 증발산량, 필요수량, 벼 생산량, 유출량, 질소 유출 부하량 등을 모의할 수 있도록 프로세스 기반 모형을 개발하였으며 기후변화 영향을 다중모형 앙상블을 이용하여 평가하였다는데 의의가 있다. 본 연구의 결과는 기후변화를 고려한 중·장기적인 식량 및 농업 수자원 정책, 물 환경 정책 수립에 기초자료로 활용될 것으로 사료된다.

REFERENCES

1. 관계부처합동. (2012). 제2차 비점오염원관리 종합대책('12~'20), 국토교통부.
2. 국립농업과학원. (2015). 농업 비점오염 유출 특성 및 관리기술 개발. 국립농업과학원.
3. 국립농업과학원. (2017). 기후변화가 논생태계 물질순환에 미치는 영향 예측. 국립농업과학원.
4. 국립농업과학원. (2018). 농업분야 물 발자국 산정방법 표준화 및 기후변화 영향평가 연구. 국립농업과학원.
5. 국립식량과학원. (2009). 2008 작황시험보고서. *국립식량과학원*.
6. 국립환경과학원. (2012). 강우유출수 조사방법. *국립환경과학원*.
7. 국토해양부. (2011). 수자원장기종합계획 (2011~2020). *국토해양부*.
8. 농림부 & 농어촌진흥공사. (1997). 영농방식 변화에 따른 필요수량 변화 연구. *농림수산식품부*.
9. 농어촌진흥공사. (1998). 수리시설물 모의조작시스템 매뉴얼. *농어촌진흥공사*.
10. 농업개발공사; 서울대학교 농업개발연구소. (1986). 작물소비수량 산정 방법의 정립. *농업진흥공사*.
11. 농촌진흥청. (1981). 수도 냉해 실태분석과 종합기술 대책, *농촌진흥청*, 21-32.
12. 농촌진흥청. (2009). 2008년도 작황시험보고서. *농촌진흥청*.
13. 류순호. (2001). 토양사전. *서울대학교출판부*.
14. Adams, R. M., Rosenzweig, C., Peart, R. M., Ritchie, J. T., McCarl, B. A., Glyer, J. D., ... & Allen Jr, L. H. (1990). Global

- climate change and US agriculture. *Nature*, 345(6272), 219.
15. Ahn, H. K., and Jeong, H. S. (2008). An Actualization Of The Watershed Management Community Via TPLM. *Korean society and public administration* 18(4): 91-114 (in Korean)
 16. Allen, L. H., Pan, D., Boote, K. J., Pickering, N. B., & Jones, J. W. (2003). Carbon dioxide and temperature effects on evapotranspiration and water use efficiency of soybean. *Agronomy Journal*, 95(4), 1071-1081.
 17. Allen, R. G., Gichuki, F. N., & Rosenzweig, C. (1991). CO₂-induced climatic changes and irrigation-water requirements. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 117(2), 157-178.
 18. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*, 300(9), D05109.
 19. Arnold, J. G., Atwood, J. D., Benson, V. W., Srinivasan, R., & Williams, J. R. (1998). Potential Environmental and Economic Impacts of Implementing National Conservation Buffer Initiative Sedimentation Control Measures. *USDA, NRCS Staff paper*.
 20. Arnold, J. G., Williams, J. R., Srinivasan, R., King, K. W., & Griggs, R. H. (1994). SWAT: Soil and water assessment tool. *US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Grassland, Soil and Water Research Laboratory*,

Temple, TX, 494.

21. Baier, W., & Robertson, G. W. (1965). Estimation of latent evaporation from simple weather observations. *Canadian journal of plant science*, 45(3), 276–284.
22. Bonhomme, R. (2000). Bases and limits to using ‘degree. day’ units. *European journal of agronomy*, 13(1), 1–10.
23. Bouman, B. A. M., Kropff, M. J., Tuong, T. P., Wopereis, M. C. S., ten Berge, H. F. M., & van Laar, H. H. (2001). ORYZA2000: Modeling Lowland Rice. *International Rice Research Institute, Los Banos*.
24. Carlson, R. W., & Bazzaz, F. A. (1980). *The effects of elevated CO₂ concentrations on growth, photosynthesis, transpiration, and water use efficiency of plants. In Environmental and climatic impact of coal utilization. Proceedings of a Symposium, Williamsburg, Virginia, USA, April 17–19, 1979. Singh, JJ; Deepak, A.(Editors). (pp. 609–623). Academic Press..*
25. Cho, J., Hwang, S., Go, G., Kim, K. Y., & Kim, J. (2015). Assessing the climate change impacts on agricultural reservoirs using the SWAT model and CMIP5 GCMs. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 57(5), 1–12. (in Korean)
26. Choi, D., Jung, J., Yoon, K., Choi, W., Cho, S., Beom, J., & Yoo, S. (2015). Comparison of Unit Load from Paddy Field by Various Estimation Methods. *Journal of Environmental Impact Assessment*, 24(5), 407–419.

27. Choi, S. K., Change, C., Kim, M. K., Change, C., Jeong, J., Choi, D., ... & Change, C. (2017a). Estimation of Crop Yield and Evapotranspiration in Paddy Rice with Climate Change Using APEX-Paddy Model. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, 59(4), 27-42. (in Korean)
28. Choi, S. K., Jeong, J. H., Cho, J. P., Hur, S. O., Choi, D. H., & Kim, M. K. (2018). Assessing the Climate Change Impacts on Paddy Rice Evapotranspiration. *J.Climate Change Res.*, 9(2), 143-156. (in Korean)
29. Choi, S. K., Jeong, J., & Kim, M. K. (2017b). Simulating the Effects of Agricultural Management on Water Quality Dynamics in Rice Paddies for Sustainable Rice Production? Model Development and Validation. *Water*, 9(11), 869.
30. Chow, T. L., Rees, H. W., & Daigle, J. L. (1999). Effectiveness of terraces/grassed waterway systems for soil and water conservation: A field evaluation. *Journal of Soil and Water conservation*, 54(3), 577-583.
31. Chung, S.O., 2010. Simulating Evapotranspiration and Yield Response of Rice to Climate Change using FAO-AquaCrop. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(3): 57-64 (in Korean).
32. Chung, S. O., Rodríguez Díaz, J. A., Weatherhead, E. K., & Knox, J. W. (2011). Climate change impacts on water for irrigating paddy rice in South Korea. *Irrigation and drainage*, 60(2), 263-273.
33. Chung, U., Cho, J., & Lee, E. J. (2015). Evaluation of

- agro-climatic index using multi-model ensemble downscaled climate prediction of CMIP5. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 17(2), 108-125.
34. Considering Uncertainty. *Journal of Climate Change Research*, 9(2), 143-156.
 35. Doll, P. (2002). Impact of climate change and variability on irrigation requirements: a global perspective. *Climatic change*, 54(3), 269-293.
 36. Döll, P., & Siebert, S. (2000). A digital global map of irrigated areas. *Icid Journal*, 49(2), 55-66.
 37. Doll, P., & Siebert, S. (2002). Global modeling of irrigation water requirements. *Water Resources Research*, 38(4), 8-1.
 38. Donigan, A. S., Imhoff, J. C., Bicknell, B. R., & Kittle, J. L. (1984). Application Guide for Hydrological Simulation Program: FORTRAN(HSPF). *EPA-600/3-84-065 June 1984. Environmental Research Laboratory, Athens, GA. 177 p, 19 fig, 17 tab, 3 app, 20 ref 68-01-6207.*
 39. Doorenbos, J. (1975). Guidelines for predicting crop water requirements. *Food and Agriculture organization. Rome, Irrig. Drainage pap.*, 24.
 40. Edwards, D. R., Daniel, T. C., Scott, H. D., Moore Jr, P. A., Murdoch, J. F., & Vendrell, P. F. (1997). Effect of BMP implementation on storm flow quality of two northwestern Arkansas streams. *Transactions of the ASAE*, 40(5), 1311-1319.
 41. Godwin, D. C., Jones, C. A., Ritchie, J. T., Vlek, P. L. G., &

- Youngdahl, L. J. (1983). The water and nitrogen components of the CERES models. *In Proceedings of the International Symposium on Minimum Data Set for Agrotechnology Transfer (ICRISAT)* (pp. 101-106).
42. Green, W. H., & Ampt, G. A. (1911). Studies on Soil Physics. *The Journal of Agricultural Science*, 4(1), 1-24.
43. Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*, 1(2), 96-99.
44. Hasegawa, T., Sakai, H., Tokida, T., Nakamura, H., Zhu, C., Usui, Y., ... & Matsunami, T. (2013). Rice cultivar responses to elevated CO₂ at two free-air CO₂ enrichment (FACE) sites in Japan. *Functional Plant Biology*, 40(2), 148-159.
45. Hong, E. M., Choi, J. Y., Lee, S. H., Yoo, S. H., & Kang, M. S. (2009). Estimation of paddy rice evapotranspiration considering climate change using LARS-WG. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 51(3), 25-35. (in Korean)
46. Horie, T., Nakagawa, H., Centeno, H. G. S., & Kropff, M. J. (1995). The rice crop simulation model SIMRIW and its testing. *Modeling the impact of climate change on rice production in Asia*, 51-66.
47. Huber, W. C., Rossman, L. A., & Dickinson, R. E. (2005). EPA storm water management model, SWMM5. *Watershed Modeling, CRC Press, Boca Raton, FL*, 339-361.
48. Hwang, S. W., Jang, T. I., & Park, S. W. (2006). Climate

- change impact on nonpoint source pollution in a rural small watershed. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 8(4), 209–221.
49. IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *IPCC, Geneva, Switzerland*.
 50. Jagadish, S. V. K., Craufurd, P. Q., & Wheeler, T. R. (2007). High temperature stress and spikelet fertility in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of experimental botany*, 58(7), 1627–1635.
 51. Jagadish, S. V. K., Sumfleth, K., Howell, G., Redoña, E., Wassmann, R., & Heuer, S. (2010). *Temperature effects on rice: significance and possible adaptation. CEEDIN, 19*.
 52. Jang, S. S., Ahn, S. R., Joh, H. K., & Kim, S. J. (2015). Assessment of climate change impact on Imha-dam watershed hydrologic cycle under RCP scenarios. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 18(1), 156–169. (in Korean).
 53. Jeon, J. H., Choi, J. K., Yoon, K. S., & Yoon, C. G. (2005). The comparison of water budget and nutrient loading from paddy field according to the irrigation methods. *Korean Journal of Ecology and Environment*, 38.
 54. Jeon, J. H., Yoon, C. G., Donigian Jr, A. S., & Jung, K. W. (2007). Development of the HSPF-Paddy model to estimate watershed pollutant loads in paddy farming regions.

- Agricultural water management*, 90(1-2), 75-86.
55. Jones, C. A. (1983). A survey of the variability in tissue nitrogen and phosphorus concentrations in maize and grain sorghum. *Field Crops Research*, 6, 133-147.
 56. Jones, C. A., Cole, C. V., Sharpley, A. N., & Williams, J. R. (1984). A simplified soil and plant phosphorus model: I. Documentation 1. *Soil Science Society of America Journal*, 48(4), 800-805.
 57. Jones, C. A., Kiniry, J. R., & Dyke, P. T. (1986). CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development. *Texas A&M University Press*.
 58. Jones, P., Allen, L. H., & Jones, J. W. (1985). Responses of Soybean Canopy Photosynthesis and Transpiration to Whole-Day Temperature Changes in Different CO₂ Environments 1. *Agronomy Journal*, 77(2), 242-249.
 59. Kim, H. Y., Lieffering, M., Kobayashi, K., Okada, M., Mitchell, M. W., & Gumpertz, M. (2003). Effects of free-air CO₂ enrichment and nitrogen supply on the yield of temperate paddy rice crops. *Field Crops Research*, 83(3), 261-270.
 60. Kim, K., Kang, M. S., Song, I., Song, J. H., Park, J., Jun, S. M., ... & Kim, J. S. (2016). Effects of Controlled Drainage and Slow-release Fertilizer on Nutrient Pollutant Loads from Paddy Fields. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, 58(1), 1-10. (in Korean)
 61. Kim, M. K., Choi, S. K., Jeong, G. B., Hong, S. C., Kim, M.

- H., & So K. H. (2015). An Overview and Applications in Agriculture of Water Footprint in Korea and U.S.. *The Journal of the Korean Society of International Agriculture*, 27(3), 303-310. (in Korean)
62. Kim, M. K., Roh, K. A., Lee, N. J., Seo, M. C., & Koh, M. H. (2005). Nutrient load balance in large-scale paddy fields during rice cultivation. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 38(3), 164-171. (in Korean)
63. Kim, U. T., Lee, D. R., & Yoo, C. S. (2004). Effects of climate change on the streamflow for the Daechung dam watershed. *Journal of Korea Water Resources Association*, 37(4), 305-314. (in Korean)
64. Kim, Y. J., Kim, H. D., & Jeon, J. H. (2014). Characteristics of water budget components in paddy rice field under the asian monsoon climate: Application of hspf-paddy model. *Water*, 6(7), 2041-2055.
65. Kimball, B. A., & Idso, S. B. (1983). Increasing atmospheric CO₂: effects on crop yield, water use and climate. *In Developments in Agricultural and Managed Forest Ecology*, 12, 55-72.
66. Knisel, W. G. (1980). CREAMS: a field scale model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems [USA]. *United States. Dept. of Agriculture. Conservation research report (USA)*.
67. Kobayashi, K., Okada, M., and Kim, H. Y. (1999) The free-air CO₂ enrichment (FACE) with rice in Japan. *Proc.*

- Int. Symp. "World Food Security", Kyoto, Japan*, 213-215.
68. Kropff, M. J., Cassman, K. G., & Van Laar, H. H. (1994). Quantitative understanding of the irrigated rice ecosystem and yield potential. In *Hybrid Rice Technology: New Developments and Future Prospects. Selected papers from the International Rice Research Conference (Manila, The Philippines: International Rice Research Institute)* (pp. 97-113).
69. Lal, M., Singh, K. K., Rathore, L. S., Srinivasan, G., & Saseendran, S. A. (1998). Vulnerability of rice and wheat yields in NW India to future changes in climate. *Agricultural and forest meteorology*, 89(2), 101-114.
70. Lee, C. K., Kwak, K. S., Kim, J. H., Son, J. Y., & Yang, W. H. (2011). Impacts of climate change and follow-up cropping season shift on growing period and temperature in different rice maturity types. *Korean Journal of Crop Science*, 56(3), 233-243. (in Korean)
71. Lee, J. K., & Kim, Y. O. (2012). Selecting climate change scenarios reflecting uncertainties. *Atmosphere*, 22(2), 149-161.
72. Lee, S. H., Lee, B. H., Kim, B. S., & Min, S. H. (2015). Impact Assessment of Water Quality in the Yeong-san River under Climate Change. *Korean Review of Crisis & Emergency Management*, 11, 257-272. (in Korean)
73. Lee, T. S., Choi, J. Y., Yoo, S. H., Lee, S. H., & Oh, Y. G. (2012). Analyzing consumptive use of water and yields of paddy rice by climate change. *Journal of the Korean Society*

- of Agricultural Engineers*, 54(1), 47–54. (in Korean).
74. Leonard, R. A., Knisel, W. G., & Still, D. A. (1987). GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems. *Transactions of the ASAE*, 30(5), 1403–1418.
 75. Li, Y., Chen, B. M., Wang, Z. G., & Peng, S. L. (2011). Effects of temperature change on water discharge, and sediment and nutrient loading in the lower Pearl River basin based on SWAT modelling. *Hydrological Sciences Journal*, 56(1), 68–83.
 76. Matthews, R. B., Kropff, M. J., Bachelet, D., & Van Laar, H. H. (Eds.). (1995). Modeling the impact of climate change on rice production in Asia. *Int. Rice Res. Inst.*
 77. McCabe Jr, G. J., & Wolock, D. M. (1992). SENSITIVITY OF IRRIGATION DEMAND IN A HUMID TEMPERATE REGION TO HYPOTHETICAL CLIMATIC CHANGE 1. *Journal of the American Water Resources Association*, 28(3), 535–543.
 78. Mera, R. J., Niyogi, D., Buol, G. S., Wilkerson, G. G., & Semazzi, F. H. (2006). Potential individual versus simultaneous climate change effects on soybean (C3) and maize (C4) crops: An agrotechnology model based study. *Global and Planetary Change*, 54(1-2), 163–182.
 79. Min, S. H., Shim, K. M., Kim, Y. S., Jung, M. P., Kim, S. C., & So, K. H. (2013). Seasonal variation of carbon dioxide and energy fluxes during the rice cropping season at rice–barley double

- cropping paddy field of Gimje. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 15(4), 273-281. (in Korean)
80. Miyazaki, N., Kamewada, K., & Iwasaki, S. (2006). Quality changes of agricultural water passing through paddy fields. *Bulletin of the Tochigi Prefectural Agricultural Experiment Station (Japan)*.
 81. Monteith, J. L. (1964), Evaporation and environment. The state and movement of water in living organisms, *Symp. Soc. Exp. Biol.*, 19, 205-234.
 82. Monteith, J. L. (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 281(980), 277-294.
 83. Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
 84. Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763-1785.
 85. Murdoch, P. S., Baron, J. S., & Miller, T. L. (2000). POTENTIAL EFFECTS OF CLIMATE CHANGE ON SURFACE WATER QUALITY IN NORTH AMERICA1. *Journal of the American Water Resources Association*, 36(2), 347-366.
 86. Murdoch, P. S., Burns, D. A., & Lawrence, G. B. (1998). Relation of climate change to the acidification of surface

- waters by nitrogen deposition. *Environmental Science & Technology*, 32(11), 1642-1647.
87. Nam, W. H., Choi, J. Y., Jang, M. W., & Hong, E. M. (2013). Agricultural drought risk assessment using reservoir drought index. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 55(3), 41-49. (in Korean)
 88. Nam, W. H., Hong, E. M., & Choi, J. Y. (2014). Uncertainty of water supply in agricultural reservoirs considering the climate change. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 56(2), 11-23. (in Korean)
 89. Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
 90. Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. *Texas Water Resources Institute*.
 91. Lane, L. J., & Nearing, M. A. (1989). USDA-Water Erosion Prediction Project: hillslope profile model documentation.
 92. Parton, W. J., Ojima, D. S., Cole, C. V., & Schimel, D. S. (1994). A general model for soil organic matter dynamics: sensitivity to litter chemistry, texture and management. *Quantitative modeling of soil forming processes*, quantitativemod, 147-167.
 93. Patterson, D. T., & Flint, E. P. (1980). Potential effects of global atmospheric CO₂ enrichment on the growth and

- competitiveness of C 3 and C 4 weed and crop plants. *Weed Science*, 28(1), 71–75.
94. Peng, S., Huang, J., Sheehy, J. E., Laza, R. C., Visperas, R. M., Zhong, X., ... & Cassman, K. G. (2004). Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(27), 9971–9975.
 95. Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 193(1032), 120–145.
 96. Phillips, D. L., Lee, J. J., & Dodson, R. F. (1996). Sensitivity of the US corn belt to climate change and elevated CO₂: I. Corn and soybean yields. *Agricultural systems*, 52(4), 481–502.
 97. Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly weather review*, 100(2), 81–92.
 98. Ramírez, J. A., & Finnerty, B. (1996). CO₂ and temperature effects on evapotranspiration and irrigated agriculture. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 122(3), 155–163.
 99. Reddy, K. R., Khaleel, R., Overcash, M. R., & Westerman, P. W. (1979). A nonpoint source model for land areas receiving animal wastes: II. Ammonia volatilization. *Transactions of the ASAE*, 22(6), 1398–1405.
 100. Richardson, C. W. (1981). Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water resources research*, 17(1), 182–190.
 101. Riley, J. J., & Hodges, C. N. (1969). Plant responses to CO₂

- enrichment: a function of the micro-environment. *In meeting of Am Assoc Adv Sci, Colorado Springs, CO, American Association for the Advancement of Science, Washington DC (1969)* (pp. 7-10).
102. Ritchie, J. T., & NeSmith, D. S. (1991). Temperature and crop development. *Modeling plant and soil systems, modelingplantan*, 5-29.
 103. Roh, K. A., Kim, M. K., Lee, B. M., Lee, N. J., Seo, M. C., & Koh, M. H. (2005). Assessment of Nitrogen Impaction on Watershed by Rice Cultivation. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 24(3), 270-279. (in Korean)
 104. Rosenberg, N. J., Kimball, B. A., Martin, P., & Cooper, C. F. (1990). From climate and CO₂ enrichment to evapotranspiration. *Climate change and US water resources*, 151-175.
 105. Sakaguchi, A., Eguchi, S., Kato, T., Kasuya, M., Ono, K., Miyata, A., & Tase, N. (2014). Development and evaluation of a paddy module for improving hydrological simulation in SWAT. *Agricultural Water Management*, 137, 116-122.
 106. Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. A., Srinivasan, R., & Hauck, L. M. (2001). validation of the swat model on a large RWER basin with point and nonpoint sources 1. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(5), 1169-1188.
 107. Satake, T., & Yoshida, S. (1978). High temperature-induced

- sterility in indica rices at flowering. *Japanese Journal of Crop Science*, 47(1), 6-17.
108. Sato, K., & Inaba, K. (1976). High Temperature Injury of Ripening in Rice Plant: V. On the early decline of assimilate storing ability of grains at high temperature. *Japanese Journal of Crop Science*, 45(1), 156-161.
 109. Seo, C. S., Park, S. W., Im, S. J., Yoon, K. S., Kim, S. M., & Kang, M. S. (2002). Development of CREAMS-PADDY model for simulating pollutants from irrigated paddies. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 44(3), 146-156.
 110. Sharpley, A. N. (1990). EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator: 1, Model Documentation. *USDA Techn. Bull.* 1759, 235.
 111. Silva, C. S., Weatherhead, E. K., Knox, J. W., & Rodriguez-Diaz, J. A. (2007). Predicting the impacts of climate change—A case study of paddy irrigation water requirements in Sri Lanka. *Agricultural water management*, 93(1-2), 19-29.
 112. Song, J. H., Kang, M. S., Song, I. H., & Jang, J. R. (2012). Comparing farming methods in pollutant runoff loads from paddy fields using the CREAMS-PADDY model. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 31(4), 318-327. (in Korean)
 113. Stockle, C. O., Williams, J. R., Rosenberg, N. J., & Jones, C. A. (1992). A method for estimating the direct and climatic effects of rising atmospheric carbon dioxide on growth and

- yield of crops: Part I – Modification of the EPIC model for climate change analysis. *Agricultural systems*, 38(3), 225–238.
114. Switanek, M. B., Troch, P. A., Castro, C. L., Leuprecht, A., Chang, H. I., Mukherjee, R., & Demaria, E. (2017). Scaled distribution mapping: a bias correction method that preserves raw climate model projected changes. *Hydrology and Earth System Sciences*.
 115. Tao, F., & Zhang, Z. (2011). Impacts of climate change as a function of global mean temperature: maize productivity and water use in China. *Climatic Change*, 105(3-4), 409–432.
 116. Tsuchiya, R., Kato, T., Jeong, J., & Arnold, J. (2018). Development of SWAT-Paddy for Simulating Lowland Paddy Fields. *Sustainability*, 10(9), 3246.
 117. Tuppad, P., Santhi, C., Wang, X., Williams, J. R., Srinivasan, R., & Gowda, P. H. (2010). Simulation of conservation practices using the APEX model. *Applied engineering in agriculture*, 26(5), 779–794.
 118. USDA, S. (1972). Section 4: Hydrology. *National Engineering Handbook, Washington, DC, Soil Conservation Service*.
 119. Wang, X., Yen, H., Liu, Q., & Liu, J. (2014). An auto-calibration tool for the Agricultural Policy Environmental eXtender (APEX) model. *Transactions of the ASABE*, 57(4), 1087–1098.
 120. White, M. J., Santhi, C., Kannan, N., Arnold, J. G., Harmel, D., Norfleet, L., ... & Haney, E. (2014). Nutrient delivery

- from the Mississippi River to the Gulf of Mexico and effects of cropland conservation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 69(1), 26-40.
121. Williams, J. R. (1975a). HYMO flood routing. *Journal of Hydrology*, 26(1-2), 17-27.
 122. Williams, J. R. (1975b). Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor.
 123. Williams, J. R., & Hann, R. W. (1972). Hymo, A problem - oriented computer language for building hydrologic models. *Water Resources Research*, 8(1), 79-86.
 124. Williams, J. R., & Hann, R. W. (1978). Optimal operation of large agricultural watersheds with water quality restraints. *Texas Water Resources Institute*.
 125. Williams, J. R., & LaSeur, W. V. (1976). Water yield model using SCS curve numbers. *Journal of the hydraulics division*, 102(ASCE# 12379).
 126. Williams, J. R., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Gassman, P. W., & Green, C. H. (2008a). History of model development at Temple, Texas. *Hydrological sciences journal*, 53(5), 948-960.
 127. Williams, J. R., Izaurralde, R. C., & Steglich, E. M. (2008b). Agricultural policy/environmental extender model. *Theoretical Documentation*, 604, 2008-17.
 128. Williams, J. R., Izaurralde, R. C., Singh, V. P., & Frevert, D. K. (2006). The APEX model. *Watershed models*, 437-482.
 129. Williams, J. R., Jones, C. A., & Dyke, P. T. (1984). A

- modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transactions of the ASAE*, 27(1), 129-0144.
130. Williams, J. R., Nicks, A. D., & Arnold, J. G. (1985). Simulator for water resources in rural basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(6), 970-986.
 131. Williams, J., Jones, C., Kiniry, J. R., & Spanel, D. (1989). EPIC and APEX. *Trans. ASABE*, 32, 0497-0511.
 132. Williams, M. M. (2015). Phenomorphological characterization of vegetable soybean germplasm lines for commercial production. *Crop Science*, 55(3), 1274-1279.
 133. Williams, J. R., Izaurralde, R. C., & Steglich, E. M. (2012). Agricultural Policy/Environmental eXtender Model. *AgriLife Research Texas A&M System*.
 134. Xu, Z., Jiang, Y., Jia, B., & Zhou, G. (2016). Elevated-CO₂ response of stomata and its dependence on environmental factors. *Frontiers in plant science*, 7, 657.
 135. Yoo, S. H., Choi, J. Y., Lee, S. H., Oh, Y. G., & Park, N. Y. (2012). The impacts of climate change on paddy water demand and unit duty of water using high-resolution climate scenarios. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 54(2), 15-26. (in Korean)
 136. Yoo, S. H., Choi, J. Y., & Jang, M. W. (2006). Estimation of Paddy Rice Crop Coefficients for FAO Penman-Monteith and Modified Penman method. *Journal of the Korean society of*

- agricultural engineers, 48(1), 12-23. (in Korean)
137. Yoo, S. H., Kim, T., Lee, S. H., & Choi, J. Y. (2015). Trend analysis of projected climate data based on CMIP5 GCMs for climate change impact assessment on agricultural water resources. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 57(5), 69-80. (in Korean)
 138. Yoon K. S., Cho, J. G., Han K. H., Choi, J. K. Son, J. G., & Cho, J. Y. (2002). Sediment Losses from a Paddy Plot during Cropping Period. *Korean Society of Rural Planning*, 8(1), 69-76. (in Korean)
 139. Yoon, K. S., Cho, J. Y., Choi, J. K., & Son, J. G. (2006). WATER MANAGEMENT AND N, P LOSSES FROM PADDY FIELDS IN SOUTHERN KOREA 1. *Journal of the American Water Resources Association*, 42(5), 1205-1216.
 140. Yun, D. K., Chung, S. O., & Kim, S. J. (2011). Climate change impacts on paddy water requirement. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 53(4), 39-47. (in Korean)
 141. Yun, S. H., & Lee, J. T. (2001). Climate change impacts on optimum ripening periods of rice plant and its countermeasure in rice cultivation. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 3(1), 55-70. (in Korean)
 142. Yun, S. H., Im, J. N., Lee, J. T., Shim, K. M., & Hwang, K. H. (2001). Climate change and coping with vulnerability of agricultural productivity. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 3(4), 220-237. (in Korean)

부 록

A.1. APEX 모형

A.1.1 세부모듈 구성

APEX 모형은 농장 및 소유역 단위 모형으로서 농장단위 모형인 EPIC 모형의 기능을 소유역으로 확장한 모형이다. APEX 모형에는 EPIC 모형의 기능과 더불어 복잡한 지형, 수로 시스템을 통한 유역 출구까지의 물, 토사, 영양물질 및 농약 추적모듈이 추가되어있다. APEX 모형은 Fig. A.1과 같이 7개의 서브모형으로 구성된다.

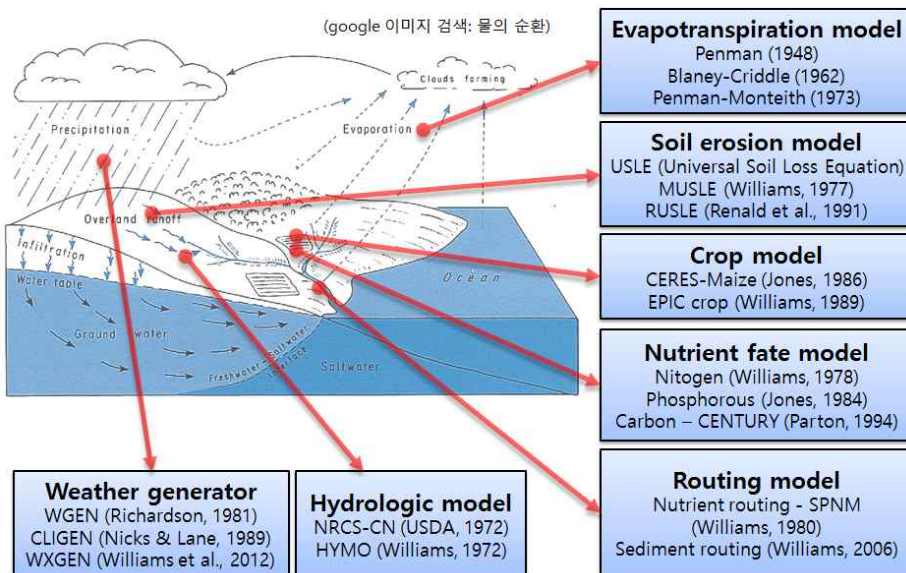


Fig. A.1 Components of the APEX model

가. 기상자료 결측치 추정

Richardson (1981)은 추계학적 기상모의에 관한 연구를 통해 일 단위 확률적 날씨 발생기인 WGEN (Weather GENerator) 모형을 개발하였다. 이후 Nicks & Lane (1989)이 CLIGEN (CLimate GENerator) 모형을 개발하여 WEPP (Water Erosion Prediction Project) 모형에 적용하였다. EPIC 모형에서는 WGEN 모형과 CLIGEN 모형의 기능을 통합하여 WXGEN 모형으로 명명하였으며 (Sharpley and Williams, 1990) APEX 모형에는 WXGEN 모형이 포함되어있다 (Williams *et al.*, 2012).

나. 수문모의

APEX 모형은 수문 및 토양침식 모형으로서 HYMO (HYdro MOdel) 프로그램 (Williams and Hann, 1972)이 내장되어 있다. HYMO는 강우-유출 모형과 단위유량곡선, 홍수 추적법과 토양손실 공식을 포함한다 (Williams *et al.*, 2012).

강우-유출모형은 NRCS-CN (Curve Number) (USDA-SCS, 1972)법과 Green & Ampt 침투식 (Green and Ampt, 1911)을 선택할 수 있다. Green & Ampt 침투식을 사용할 경우 강우강도와 지속시간의 영향을 평가할 수 있지만, 대부분 토양특성과 관리방식을 반영할 수 있는 NRCS CN법을 사용한다 (Williams *et al.*, 2008a). 단위유량곡선의 경우 2변수 γ 분포를 사용하여 직접유출을 나타내는 상승곡선과 침투유량, 변곡점까지의 하강곡선을 산정하였으며 변곡점으로부터 기저유출까지의 하강곡선은 1변수 지수방정식을 이용하여 표현하였다 (Williams, 1968). 이후 하강곡선이 여러 실측결과에 비하여 빠른 감소를 보임에 따라 Williams (1973)은 지수방정식을 2개의 부분으로 나누었다.

다. 증발산 모의

증발산량은 Penman (Penman, 1948), Penman-Monteith (Monteith, 1964), Priestley-Taylor (Priestley and Taylor, 1972), Hargreaves (Hargreaves and Samani, 1985), Baier-Roberton (Baier and Robertson, 1965) 공식으로 산정되며 5가지 증발산모형 중 하나를 선택하여 사용할 수 있다. 모형이 요구하는 기후자료가 부족한 경우에는 APEX 모형에 내장되어있는 기상자료 추정 모듈(WXGEN)이 만들어내는 자료를 사용한다.

라. 토양침식 모의

토양침식 모형은 수정범용토양손실공식 (MULSE; Modified Universal Soil Loss Equation)을 사용한다. 수정범용토양손실공식은 기존의 범용토양손실공식 (USLE; Universal Soil Loss Equation)의 강우에너지인자를 유출인자로 대체하였으며 토사량을 침투유량과 토사운송률을 이용하여 산정한다 (Williams, 1975b).

마. 작물생장 및 생육 모의

APEX 모형의 작물 모형은 Williams *et al.* (1989)의 EPIC 작물 모형을 포함하고 있다. EPIC 작물 모형은 J. T. Ritchie의 작물 모형 개발팀이 개발한 CERES-Maize (Crop-Environment REsource Synthesis) 모형 (Jones *et al.*, 1986)을 기반으로 하고 있으며, 토양과 물, 양분공급에 대해 작물 생육이 민감하게 반응하는 모형으로 작물 뿐만 아니라 목초에 대한 모의도 가능하다 (Williams *et al.*, 2012).

바. 영양물질 거동 모의

영양물질 모형은 EPIC 모형에 적용하기 위해 개발되었으며 이후 APEX 모형에 활용되었다. Williams and Hann (1978)은 물과 토사를 통한 질소 (N)의 유출과 침투, 탈질, 고정, 무기화, 작물의 흡수에 대한 모형을 개발하였으며, Jones *et al.* (1984)은 질소 모형을 기반으로 인 (P)에 대한 모형을 개발하였다. 탄소의 순환 및 전환에 관한 모형은 CENTURY 모형 (Parton *et al.*, 1994)을 기반으로 한다.

사. 홍수추적

홍수 추적법은 저류계수 방식 (VSC; Variable Storage Coefficient)의 홍수 추적법을 따른다. VSC는 수면경사를 고려한 비정상류 방정식으로 음함수식을 이용하여 산정한다 (Williams, 1975a).

A.1.2 데이터 및 입출력 구조

APEX 모형의 입출력 시스템은 Fig. A.2와 같다. SITE.DAT는 모형이 구동되는 구역의 목록, SUBA.DAT는 해당 구역의 하위영역(subarea) 목록으로서 하위영역파일인 *.SUB의 일련번호와 파일명으로 구성된다. 하나의 하위영역은 하나의 농장 개념으로서 기후, 토양, 지형, 농작업 일정 등이 동질하다는 가정을 한다. *.SUB 파일은 토양 목록(SOIL.DAT)의 토양 일련번호, 농작업 일정 목록(OPSC.DAT)의 농작업 일정 일련번호, 기상관측소 목록(WDLST.DAT)의 기상관측소 일련번호 등의 자료로 구성되어 모형 구동을 위한 자료들을 연계한다.

APEXCONT.DAT는 APEX 모형의 모의 기간, 초기값, 모형 구동시 사용하는 세부모형의 종류 등을 지정한다. 예를 들어 잠재 증발산량 추정식 코드인 IET 변수를 1로 설정할 경우 APEX 모형은 Penman-Monteith 식을 이용하여 증발산 모의를 하며, 4를 선택할 경우 Hargreaves 식을 사용한다.

WPM1.DAT는 기상관측소별 월별 통계자료 목록으로 해당 기상관측소의 일련번호, 위도, 경도, 고도 정보, 월 단위 기후 통계자료인 *.WP1 파일명을 포함한다. WIND.DAT는 풍식과 관련된 풍속 관측소 리스트로 본 연구에서는 고려하지 않는다. WDLST.DAT는 모형에 사용되는 일 단위 기상자료의 목록으로 기상관측소 일련번호와 일 단위 기상자료인 *.DLY 파일을 연결한다. *.dly 파일은 일 단위 일사량 (MJ/m^2), 최고·최저기온 ($^{\circ}\text{C}$), 강수량 (mm), 상대습도 (-), 평균풍속 (m/s) 자료로 구성된다.

SOIL.DAT는 모형 구동을 위한 토양통 파일의 목록이며 일련번호

에 따라 *.SOL 파일을 불러들이는데 사용된다. *.SOL 파일은 토양 알베도, 수문학적 토양균, 지하수위 등의 일반사항과 층위별 토양특성자료로서 깊이 (m), 용적밀도 (ton/m³), 포장용수량에서의 수분함량, 위조점 수분함량, 포화수리전도도 (mm/h) 등의 물리적 정보와 양이온교환용량 (CEC), 전기전도도 (EC), 초기 N, P 농도 등의 정보가 포함된다.

PARM.DAT는 모형의 방정식과 관련된 매개변수 정보를 담고 있다. PARM.DAT의 매개변수는 S-curve 매개변수와 기타 매개변수, 비용매개변수로 분류된다. S-curve는 APEX 모형이 많은 자연현상을 모사하는 과정에서 사용된다. S-curve는 다음과 같이 구성된다.

$$Y = \frac{x}{x + e^{b_1 - b_2 x}} \quad (A.1)$$

여기서, Y와 x는 각각 S-curve의 y값, x값으로서 무엇을 모사하기 위해 S-curve를 사용하는지에 따라 다른 의미를 갖는다. b₁과 b₂는 S-curve의 매개변수이다. 기타 매개변수는 S-curve가 아닌 함수식의 매개변수로서 총 94개로 이루어져있다. 비용 매개변수는 관개용수 비용 (\$/mm), 석회 비용 (\$/ton), 연료비용 (\$/liter), 인건비 (\$/hour)로 구성된다.

OPSC.DAT는 농작업 일정 목록으로서 농작업 일정 자료인 *.OPS의 일련번호와 파일명으로 구성된다. *.OPS 파일은 농작업 날짜와 농작업의 내용을 포함한다. CROP.DAT의 작물 일련번호, FERT.DAT의 비료 일련번호, TILL.DAT의 농작업 및 농기계 일련번호 등으로 구성되며 경운, 파종, 시비, 관개 등이 모형에 반영될 수 있도록 한다.

CROP.DAT는 작물 매개변수 파일로서 최대 LAI, 성장단계별 LAI 비율, 광이용효율지수, 생산지수 등에 대한 정보를 포함한다. TILL.DAT는 농작업 또는 농기계 특성에 대한 자료이며 비료시비 방법, 관개방법, 경운방법 및 경운 깊이 등에 대한 정보로 구성된다. FERT.DAT는 비료 목록 자료로서 비료의 일련번호, 이름, 화학적 구성에 대한 정보를 포함한다. 비료의 화학적 구성 정보는 무기태의 질소, 인, 칼륨 비율과 가축분뇨와 같은 유기비료의 질산태 질소 ($\text{NO}_3\text{-N}$), 암모니아태 질소 ($\text{NH}_4\text{-N}$), 인, 유기탄소의 비율로 구성된다.

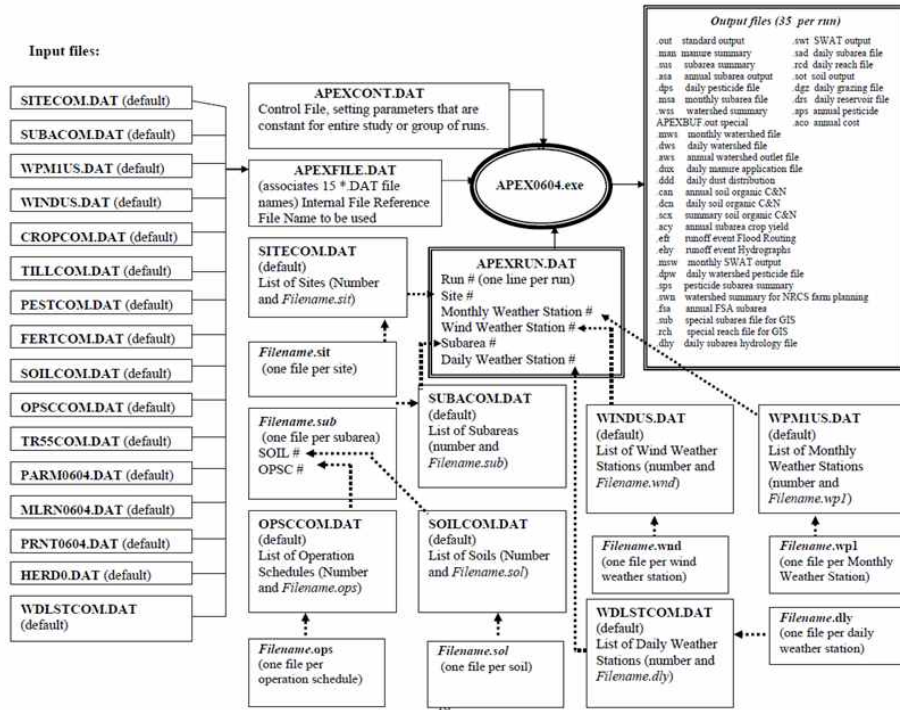


Fig. A.2 APEX model Input/Output system (Steglich and Williams, 2013)

A.1.3 작물생장, 증발량 및 증산량 산정

APEX 모형은 대기중 이산화탄소 농도 변화와 이에 따른 기후변화가 작물생육 및 증발산량에 미치는 영향을 모의할 수 있다. APEX 모형은 광합성기작을 모의하지 않지만 복사에너지 사용효율 (radiation use efficiency)에 따라 바이오매스의 증가량을 계산하고 이는 최종적인 작물생산량에 영향을 준다 (Stockle *et al.*, 1992). 바이오매스의 잠재적인 증가량은 다음의 식으로 산정된다 (Monteith, 1977).

$$DDM = \alpha \times PAR \{ RUE - WVP \times \max(VPD - 1, -0.5) \} \quad (A.2a)$$

$$PAR = 0.5 R_a (1.0 - e^{-0.65 LAI}) \quad (A.2b)$$

$$VPD = e_s - e_d \quad (A.2c)$$

$$RUE = 100 \times \frac{CO_2}{CO_2 + e^{\frac{bc1 - bc2 \times CO_2}{bc1 - bc2 \times CO_2}}} \quad (A.2d)$$

여기서, DDM 은 일 단위 바이오매스의 증가량 (ton/ha/day), α 는 단위 보정을 위한 변수로서 0.001의 값을 가지며 RUE 는 복사에너지 사용효율 ($kg \cdot ha^{-1}/MJ \cdot m^{-1}$), PAR 은 광합성 활성 복사선 ($MJ/m^2/d$), VPD 는 증기압차 (kPa), WVP 는 RUE 와 VPD 와 관련된 작물매개변수, REG 는 작물의 스트레스인자이다. R_a 는 외기복사량 ($MJ/m^2/d$), LAI 는 엽면적지수이며 e_s 는 일 평균기온에 대한 포화수증기압 (kPa), e_d 는 대기 중 수증기압 (kPa) 이다. CO_2 는 대기중 이산화탄소 농도, $bc1$, $bc2$ 는 Stockle *et al.* (1992)의 연구에 의한

$RUE-CO_2$ 반응 매개변수이다. RUE 와 CO_2 의 관계는 Fig. A.3과 같다. CO_2 농도 상승에 따라 복사에너지 사용효율이 증가하나 일정 수준 이상에서는 증가가 둔화된다.

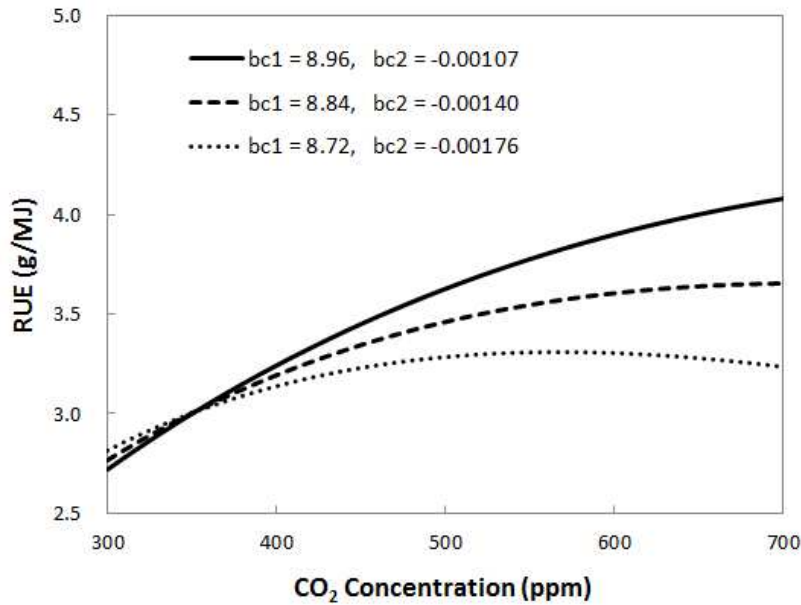


Fig. A.3 Response of radiation use efficiency(RUE) to CO_2 concentration

증발산량 산정 시 Penman-Monteith 공식을 사용할 경우 CO_2 와 VPD 의 영향을 고려하여 증발량 및 증산량을 산정할 수 있다. Stockle *et al.* (1992)은 Penman-Monteith 공식이 공기동역학적 저항 (aerodynamic resistance)과 캐노피저항 (canopy resistance)을 고려하기 때문에 CO_2 와 VPD 의 영향을 반영하도록 공식을 수정하였다. 수정된 Penman-Monteith 공식은 EPIC 모형과 APEX 모형에 적용 되었으며 그 식은 다음과 같다 (Williams *et al.*, 2012).

$$\lambda E_o = \frac{\Delta R_n + 86.66 \rho_a VPD u_{10} / 350}{\Delta + \gamma} \quad (\text{A.3})$$

여기서, E_o 는 잠재증발량 (mm/d), Δ 는 포화수증기압 곡선의 기울기 (kPa/°C), R_n 은 순복사량 (MJ/m²/d), ρ_a 는 공기밀도 (kg/m³), VPD 는 증기압차 (kPa), u_{10} 은 지상 10m 지점에서의 평균풍속 (m/s), λ 는 기화잠열 (MJ/kg), γ 는 습도계 상수 (kPa/°C)이다.

식물의 의한 증산량 (E_p , mm/d)은 다음과 같이 산정된다.

$$E_p = \frac{\Delta R_n + 86.66 \rho_a VPD / r_a}{\lambda \left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right) \right]} \quad (\text{A.4})$$

여기서, r_a 는 열과 증기이동에 대한 공기동역학적 저항 (s/m), r_c 는 증기이동에 대한 캐노피저항 (s/m)이다. 캐노피저항은 증기압차 (VPD)와 대기중 이산화탄소 농도 (CO_2)의 함수로서 낮은 증기압차와 높은 이산화탄소 농도는 기공유통성 (stomatal conductance)을 낮추게 되므로 캐노피저항을 높이는 결과를 가져온다 (Stockle *et al.*, 1992).

$$r_c = \frac{p_1}{\sum LAI g_1 e^{0.00155(330 - CO_2)}} \quad (\text{A.5})$$

p_1 은 1.0~2.0 사이의 값을 갖는 매개변수이며, LAI 는 작물의 엽면적지수, g_1 은 잎의 공기유통성 (m/s)으로서 증기압차의 함수이며 작물에 따라 다른 값을 가진다.

엽면적지수는 출현으로부터 잎의 쇠락 전까지 다음의 식을 따른다

(Williams *et al.*, 2012).

$$LAI = LAI_0 + \Delta HUF \times XLAI \times \sqrt{REG} \times \frac{LAI_0}{TLAI} \quad (A.6a)$$

$$HUF = \frac{HUI}{HUI + e^{\alpha - \beta \cdot HUI}} \quad (A.6b)$$

$$HUI = \frac{\sum_j HU_j}{PHU} \quad (A.6c)$$

$$HU_j = \frac{T_{\max,j} - T_{\min,j}}{2} - T_b, \quad HU > 0 \quad (A.6d)$$

여기서, LAI_0 는 작물의 일 초기 엽면적지수이며 $XLAI$ 는 작물 최대 엽면적지수, $TLAI$ 는 생장기간 중 총 엽면적지수, ΔHUF 는 열단위의 일 변화량이다. HUI 는 작물의 열단위지수 (heat unit index), HUF 는 작물의 열단위 (heat unit factor)이며 α 와 β 는 작물의 생육 특성에 따른 계수이다. j 는 재배일 (day), HU 는 열단위, T_{\max} 는 일 최고기온 ($^{\circ}\text{C}$), T_{\min} 는 일 최저기온 ($^{\circ}\text{C}$), T_b 는 생육기저온도 ($^{\circ}\text{C}$), PHU 는 작물이 출현하여 생리적 성숙에 도달하기까지의 열단위의 총량이다.

잎의 노화가 시작하여 생장시기가 끝날 때까지 LAI 는 다음의 식으로 산출된다.

$$LAI = LAI_0 \left(\frac{1 - HUI}{1 - HUID} \right)^{ad} \quad (A.7)$$

여기서, $HUID$ 는 LAI 가 감소하기 시작할 때의 HUI 이며 ad 는 LAI 감소율을 제어하는 작물매개변수이다.

A.1.4 생산량 추정

APEX 모형에서 작물 수확량은 수확지수(Harvest Index) 개념을 사용하여 예측한다 (Williams *et al.*, 2015).

$$YLD = HI \times STL \quad (A.8)$$

여기서 YLD 는 단위면적당 수확량 (ton/ha), HI 는 수확지수로서 0~1 사이의 값이며, STL 은 작물의 뿌리를 제외한 지상 부 바이오매스 (t/ha)이다. 수확지수는 다음 식에 따라 파종기 0에서 비선형적으로 증가한다. 수확지수는 기온과 수분부족으로 인해 잠재수확지수보다 감소될 수 있다.

$$HIT = HIP \times \frac{100HUI}{100HUI + e^{11.11 - 10HUI}} \quad (A.9a)$$

$$F = \frac{SWH}{SWH + e^{5.563 - 0.03155SWH}} \quad (A.9b)$$

$$HI = F \times (HIT - HIMN) + HIMN \quad (A.9c)$$

여기서, HIT 는 열단위지수(HUI)와 관련된 수확지수이며, HIP 는 잠재 수확지수, SWH 는 작물의 누적수분 사용량 (mm), $HIMN$ 은 최소 수확지수이다. HIT 는 기온에, F 는 증산량에 영향을 받는 S-curve로서 식의 상수 값은 HIT 의 경우 HUI 가 0.5일 때 0.1로, HUI 가 0.95일 때 0.95로 증가하도록, F 의 경우 SWH 가 10일 때 0.05로, 100일 때 0.90으로 증가하도록 설정된 값이다 (작물의 특성에 따라 S-curve 매개변수를 조정할 경우 상수 값이 변한다). 이때 HIT 는 HUI 가 1.0 이상일 때 잠재 수확지수에, F 는 SWH 가 150 mm 이상일 때 1.0에 매우 근접한 값을 갖는다 (Fig.A.4).

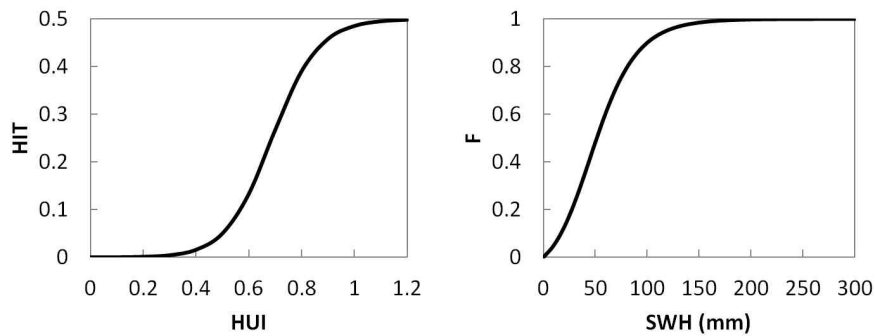


Fig. A.4 Correlation between HUI and HIT, SWH and F

A.1.5 생장제한

작물의 잠재적인 생장과 수확량은 작물을 둘러싼 환경의 제약으로 제한을 받는다. APEX 모형은 수분, 양분, 온도, 통기 및 태양복사 등에 의한 작물 스트레스를 모의할 수 있다 (Williams *et al.*, 2015). 각 스트레스 지수의 범위는 0.0~1.0이며 모든 스트레스 지수의 곱이 작물스트레스인자 (*REG*)가 된다. 작물스트레스인자는 식 A.8 과 같이 생장에 영향을 준다.

식 A.2에 의해 산정된 잠재적인 바이오매스는 다음 식을 통해 일 단위로 조정된다.

$$DDM' = DDM \times REG \quad (A.10)$$

여기서, DDM' 은 실제 일 단위 바이오매스 증가량 (ton/ha/day), REG 는 작물 생장을 조절하는 인자이다.

수분스트레스인자는 다음과 같이 물의 수요와 공급을 고려하여 산정한다.

$$WS = \frac{AEP}{EP} \quad (A.11)$$

여기서, WS 는 수분스트레스인자, AEP 는 작물의 실 증산량 (mm/d), EP 는 작물의 잠재 증산량 (mm/d)이다.

작물의 온도스트레스는 다음 식으로 산정한다.

$$TS = \sin(1.5707 \times RTO) \quad \text{if } 0.0 < RTO < 2.0 \quad (A.12a)$$

$$TS = 0.0 \quad \text{if } RTO < 0.0 \text{ or } RTO > 2.0 \quad (A.12b)$$

$$RTO = \frac{TX - TBSC}{TOPC - TBSC} \quad (A.12c)$$

여기서, TS 는 작물의 온도스트레스인자, TX 는 일 평균기온 ($^{\circ}\text{C}$), $TBSC$ 는 작물의 기저온도, $TOPC$ 는 작물의 최적온도이다. 만약 작물의 기저온도가 10°C 이며 최적온도가 25°C 일 경우 (벼) 온도스트레스인자는 일 평균기온에 따라 Fig. A.5의 분포를 보인다. 따라서 재배시기 이상저온 또는 고온현상이 지속될 경우 작물의 생장 스트레스를 받아 바이오매스 축적량 및 엽면적 증가분이 감소하게 된다.

질소와 인 스트레스인자는 작물의 양분 요구량과 실제 양분 흡수량의 비에 기반한다. APEX 모형에서 양분스트레스인자는 최적의 질소와 인 조건에서 1.0, 질소와 인 흡수량이 최적수준의 절반일 때 0.0까지 비선형으로 변화도록 설정되어있다 (Jones, 1983).

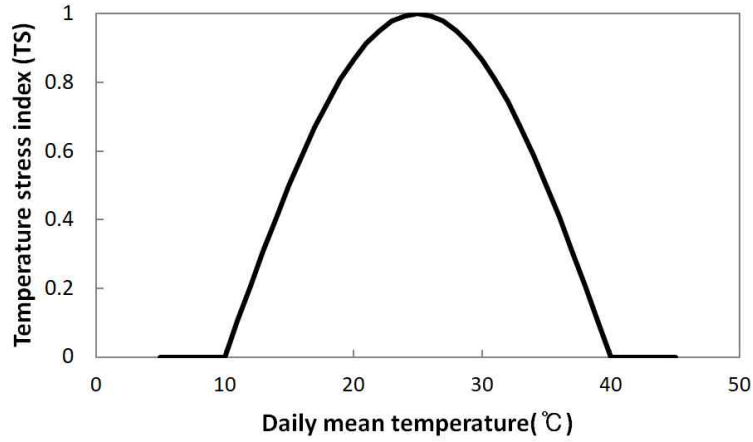


Fig. A.5 Distribution of crop(rice) temperature stress factors according to daily average temperature

$$SN = \frac{SNS}{SNS + e^{4.065 - 0.0535SNS}} \quad (A.13a)$$

$$SNS = 200 \times \frac{UM}{UNO} \quad (A.13b)$$

여기서, SNS 은 질소스트레스인자, UM 은 작물의 실 질소함량 (kg/ha), UNO 는 최적조건에서의 작물의 질소함량 (흡수량) (kg/ha)이다. UNO 는 다음의 식과 같이 작물의 바이오매스와 작물의 질소농도의 곱으로 산정된다.

$$UNO = DM \times (b_{n1} + b_{n2} \times e^{-b_{n3} \times HUT}) \quad (A.14)$$

여기서 DM 은 누적 바이오매스 (t/ha), b_{n1} , b_{n2} , b_{n3} 는 작물의 질소농도를 작물의 생장단계 (HUT)와의 함수로 표현하기 위해 사용하는 매개변수이다. 최적 조건에서 작물의 질소농도는 생장단계가 증가할수록 감소한다 (Jones, 1983).

토양으로부터의 질소 흡수량은 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 질량류에 의해 제한된다.

$$UN(i) = WNO_3(i) \times \frac{UW(i)}{ST(i)} \quad (\text{A.15})$$

여기서, i 는 토양층 일련번호이다. 토양층 i 에 대하여 UN 는 흡수된 질소량 (kg/ha), WNO_3 는 토양층에 존재하는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 양 (kg/ha), ST 는 토양수분 함량 (mm), UW 는 수분 이용량 (mm)이다.

질량류는 다음과 같이 질소의 수요와 공급에 제한을 받는다.

$$UN'(i) = UN(i) \times \frac{DMN}{SPN} \quad \text{if } DMN < SPN \quad (\text{A.16a})$$

$$UN'(i) = UN(i) + DMN - SPN \quad \text{if } DMN > SPN \quad (\text{A.16b})$$

여기서, $UN'(i)$ 는 토양층 i 에서 실제 작물이 흡수한 질소량 (kg/ha), DMN 은 일 단위 작물의 질소 수요 (kg/ha), SPN 은 일 단위 모든 토양층에서 흡수하는 질소량 (kg/ha)이다. 수요가 공급보다 작을 경우는 식 A.21a에 따라 DMN/SPN 비를 이용하여 질량류에 따른 질소 흡수량을 제한한다. 수요가 공급보다 클 경우에는 근균역에서 이용 가능한 모든 질소를 사용하기 위해 모든 토층에서 WNO_3 가 0이 될 때 까지 토양 표면에서부터 각 층으로 식 A.21b에 따라 $UN'(i)$ 가 산정된다.

A.1.6 유출량 산정

APEX 모형은 SCS 유출 곡선식 (USDA-SCS, United State Department of Agriculture Soil Conservation Service, 1972)을 이용하여 일일 강수량으로부터 지표유출량을 추정한다.

$$Q = \frac{(RFV - 0.2s)^2}{(RFV - 0.8s)} \quad \text{if } RFV > 0.2s$$

$$Q = 0.0 \quad \text{if } RFV \leq 0.2s$$
(A.17)

Q 는 일 유출량 (mm), RFV 는 일 강수량 (mm), s 는 유역의 토양수분 저류 가능량 (mm)이며 유출곡선지수 (CN, runoff Curve Number)와 관련이 있다 (USDA-SCS, 1972).

$$s = 254 \times \left(\frac{100}{CN} - 1 \right)$$
(A.18)

여기서, 254는 inch와 mm의 단위 보정 값이다.

s 는 토양, 토지이용 및 관리, 경사도, 토양수분함량 등에 따라 변한다. USDA-SCS (1972)는 선행토양수분조건 (AMC, Antecedent soil Moisture Condition) 2단계 (AMC-II), 5% 경사도에 대한 CN 값을 기준으로 경사도에 대한 CN 값을 보정하기 위해 다음 식을 개발하였다.

$$s_{2s} = s_2 \times \left(1.1 - \frac{STP}{STP + e^{3.7 + 0.02117STP}} \right)$$
(A.19)

s_{2s} 는 경사도에 따라 조정된 CN_2 (AMC-II에 해당하는 CN)에 대한 토양수분 저류 가능량 (mm)이며, STP 는 유역평균경사도이다.

APEX 모형은 토양수분함량에 따른 CN 값의 보정 방법으로서 USDA-SCS 방법 (USDA-SCS, 1972), CREAMS 모형에 적용된 방법 (Knisel, 1980), EPIC 모형에 도입된 방법 (Williams *et al.*, 1984), 보정 없이 고정값을 사용하는 방법, 토양수분 지표 (SWI, Soil Water Index)법 (Williams and Laseur, 1976)을 수정한 방법 (Williams *et al.*, 2015)으로 총 5가지 방법 중 하나를 선택할 수 있다.

USDA-SCS (1972) 매뉴얼에 따르면 AMC-I (건조)에 대한 유출곡선지수 (CN_1)와 AMC-III (습윤)에 해당하는 유출곡선지수 (CN_3)는 CN_2 를 기준으로 다음과 같이 보정된다.

$$CN_1 = CN_2 - 20 \frac{C_2}{C_2 + e^{2.533 - 0.0636 C_2}} \quad (A.20a)$$

$$CN_3 = CN_2 \times e^{0.00673 C_2} \quad (A.20b)$$

$$C_2 = 100 - CN_2 \quad (A.20c)$$

CREAMS 모형 (Knisel, 1980)은 다음 방정식을 이용하여 토양수분 함량과 s 를 직접 연관시켰다.

$$s = s_1 \times (1.0 - FFC) \quad (A.21a)$$

$$FFC = \frac{ST - WP}{FC - WP} \quad (A.21b)$$

s_1 은 CN_1 에서의 토양수분 저류 가능량 (mm), FFC 는 토양유효수분율, FC 는 포장용수량 (field capacity)의 수분함량 (33 kPa의 토양수분장력에 해당하는 토양수분함량), WP 는 위조점 (wilting point)의 수분함량 (1500 kPa의 토양수분장력에 해당하는 토양수분함량), ST

는 뿌리층의 토양수분함량이다.

CREAMS 모형에서 토양수분에 따라 보정된 토양수분 저류 가능량 (s)은 위조점에서 s_1 으로 시작하여 포장용수량에서 0.0의 값을 갖는다. s 가 0.0일 경우 CN 은 100을 의미하는데 이는 모래와 같은 토양에서는 지나치게 높은 수준이다.

따라서 EPIC 모형에서는 다음과 같은 비선형 토양수분 저류 가능량 추정공식을 도입하였다 (Williams *et al.*, 1984).

$$s = s_1 \times \left(\frac{1 - FFC}{FFC + e^{w_1 - w_2 \times FFC}} \right) \quad (A.22)$$

w_1 과 w_2 는 각각 $FFC=0.6$ 일 때 $s = s_2$, $(ST - FC)/(PO - FC) = 0.5$ 일 때 $s = s_3$ 라는 가정 하에 산정되는 매개변수이며 PO 는 토층의 공극량 (mm)이다 (Williams *et al.*, 2015).

토양수분지표법은 매개변수 P_{42} , P_{44} 의 설정에 따라 $0.0 \sim s_1$ 또는 그보다 더 큰 값으로 보정된 s 값을 반환한다.

$$s = s_0 + PET \times e^{-P_{42} \frac{s_0}{s_1}} - RFV + Q \quad (A.23a)$$

$$s = P_{44} \times s_1 \quad \text{if } s > P_{44} \times s_1 \quad (A.23b)$$

여기서 s_0 는 전일의 토양수분 저류 가능량 (mm), PET 는 잠재증발산량, RFV 는 일 강수량 (mm/d), Q 는 일 유출량 (mm/d)이다. 매개변수 P_{42} 는 토양수분 저류 가능량 보정에 잠재증발산량의 영향을 제어하며 매개변수 P_{44} 는 토양수분 저류 가능량의 상한값을 결정하는데 관여한다.

A.1.7 양분 거동

가. 질소의 용탈, 지표유출 및 지표하 유동

토양층에서의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 이동은 다음과 같이 농도 변화를 고려하여 모의된다.

$$QNO_3 = QT \times CNO_3 \quad (\text{A.24})$$

여기서 QNO_3 는 토양층에서 이동하는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 중량 (kg/ha/d), QT 는 해당 토양층의 침투량 (mm/d), CNO_3 는 해당 토양층의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 평균농도 (kg/mm/ha)를 의미한다. 마지막에 토양층에 남아 있는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 중량 및 평균농도는 다음과 같다.

$$WNO_3' = WNO_3 - QNO_3 \quad (\text{A.25a})$$

$$CNO_3' = CNO_3 - CNO_3 \times \frac{QT}{bs1 \times PO} \quad (\text{A.25b})$$

여기서, WNO_3 , WNO_3' 와 CNO_3 , CNO_3' 는 각각 해당 일의 시작과 마지막 시점의 토양층에 포함된 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 중량 (kg/ha)과 농도 (kg/mm/ha)이다. PO 는 토양공극률 (-), $bs1$ 은 토양공극 중 침투수의 비율이다.

한편, 위와 같은 토양층 내 질소농도의 변화는 연속적으로 일어나므로 다음과 같이 지수방정식으로 수정된다.

$$CNO_3' = CNO_3 \times e^{-\frac{QT}{bs1 \times PO}} \quad (\text{A.26a})$$

$$QNO_3 = WNO_3 \times \left(1 - e^{-\frac{QT}{bs1 \times PO}}\right) \quad (\text{A.26b})$$

침투수는 수직유동과 수평유동으로 분리되는데 일반적으로 수직유

동의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도 (CO)가 수평유동 농도 (CS)보다 높은 편이다. 모형의 매개변수 P_{14} 는 0.0~1.0 (기본 값 0.5)의 값을 가지며 다음 식을 통해 $\text{NO}_3\text{-N}$ 이동을 수직이동과 수평이동으로 분리한다.

$$P_{14} = \frac{CS}{CO} \quad (\text{A.27a})$$

$$QNO_3 = CO \times QV + CS \times QH \quad (\text{A.27b})$$

여기서, QV 와 QH 는 각각 수직, 수평방향으로의 토양수분 이동량 (mm/d)을 의미한다. 따라서, CO 와 CS 를 산정하는 과정은 다음과 같다.

$$CO = \frac{QNO_3}{QV + p_{14} \times QH} \quad (\text{A.28a})$$

$$CS = p_{14} \times CO \quad (\text{A.28b})$$

지표유출, 지표하 유출, 토양 내 수평관(나무뿌리에 의한 구멍, 인위적인 배수관 형성 - 배수개선을 위한 두더지굴 등)을 통한 질소 부하량은 유출량에 CS 를 곱한 값으로 산정되며, 용탈(leaching) 및 수직관을 통한 부하량은 하방 침투량에 CO 를 곱하여 산정된다.

나. 탈질(Denitrification)

탈질은 온도와 수분함량의 함수이다. 탈질량 예측은 다음 식을 사용한다.

$$DN = WNO_3 \times (1 - e^{-1.4 \times TFN \times WOC}) \quad \text{if } SWF > 0.95 \quad (\text{A.29a})$$

$$DN = 0.0 \quad \text{if } SWF < 0.95 \quad (\text{A.29b})$$

DN 은 탈질량 (kg/ha/d), TFN 은 양분순환 온도계수, WOC 는 총 유기탄소 농도 (%), SWF 는 토양수분 인자이다. TFN 과 SWF 는 다음과 같이 산정된다. $STMP$ 는 토양층 중앙의 토양온도 (°C)이다.

$$TFN = \frac{STMP}{STMP + e^{5.059 - 0.2504 \times STMP}} \quad (A.30a)$$

$$SWF = 0.1 \left(\frac{ST}{WP} \right)^2 \quad \text{if } ST < WP \quad (A.30b)$$

$$SWF = 0.1 + 0.9 \sqrt{\frac{ST - WP}{FC - WP}} \quad \text{if } ST > WP \quad (A.30c)$$

다. 질산화(Volatilization)

질산화는 NH_4-N 을 NO_3-N 으로 전환하는 과정으로서 Reddy *et al.* (1979)와 Godwin *et al.* (1984)이 제시한 방법을 결합하여 다음과 같이 산정된다.

$$RNV = WN H_3 (1 - e^{-AKN - AKV}) \quad (A.31a)$$

$$AKN = TF \times SWF' \times PHF \quad (A.31b)$$

$$TF = 0.041 (STMP - 5.0) \quad \text{if } STMP > 5.0 \quad (A.31c)$$

$$SWF' = \max \left(0.1, SWF, \frac{ST - WP}{ST_{25} - WP} \right) \quad \text{if } ST < ST_{25} \quad (A.31d)$$

$$SWF' = 1.0 \quad \text{if } ST_{25} < ST < FC \quad (A.31e)$$

$$SWF' = \max \left(0.1, 1 - \frac{ST - FC}{PO - FC} \right) \quad \text{if } ST > FC \quad (A.31f)$$

$$PHF = 0.307 \times PH - 1.269 \quad \text{if } PH < 7.0 \quad (A.31g)$$

$$PHF = 1.0 \quad \text{if } 7.0 < PH < 7.4 \quad (A.31h)$$

$$PHF = 5.367 - 0.599 \times PH \quad \text{if } PH > 7.4 \quad (A.31i)$$

여기서 RNV 는 질산화와 휘산에 의해 손실되는 질소의 양 (kg/ha/d)이고, WNH_3 는 토양 중 암모니아의 중량 (kg/ha), AKN 은 질산화 보정계수, AKV 는 휘산 보정계수, ST 는 토양수분함량, WP 는 위조점 수분함량, FC 는 포장용수량에서의 토양수분함량, ST_{25} 는 $WP+0.25(FC-WP)$ 에서의 수분함량, PH 는 토양 pH이며 SWF 는 식 A.35에서 산정된다.

라. 질소휘산(Volatilization)

지표면의 암모니아는 휘산을 통해 대기로 유실된다. 암모니아 휘산은 질산화와 동시에 진행되는 데 다음과 같이 온도와 풍속의 함수로 산정된다.

$$AKV = TF \times WNF \quad (\text{surface soil layer}) \quad (A.32a)$$

$$WNF = 0.335 + 0.16 \times \ln(U10 + 0.2) \quad (A.32b)$$

여기서 WNF 는 지표면 (토양층 1)의 질소휘산에 관한 풍속인자, $U10$ 은 지상 10 m 지점의 평균풍속 (m/s)이다.

마. 인 유출량

지표유출수 내 인 유출량은 용존성 인 유출량과 유사에 의한 인 유출량으로 구분된다. APEX 모형에서 인 유출량은 GLEAMS 모형 (Leonard *et al.*, 1987)에 제안된 농약의 용액과 퇴적물 형태 유출 개념을 차용하였다. 인은 대부분 유사량과 관련이 있기 때문에 용존성 인 유출 식은 다음과 같이 단순하게 표현된다.

$$YSP = 0.01 \times \frac{CSP \times Q}{KD} \quad (A.38)$$

여기서 YSP 는 유출량 Q (mm)에 의해 유실되는 용존성 인의 양 (kg/ha), CSP 는 토양층 1에 존재하는 불안정한 (labile) 인의 농도 (g/ton), KD 는 수용성 인 농도와 유사 중 인 농도의 비율로 APEX 모형에서 사용되는 KD 값은 100이다.

유사에 의한 인 유출은 다음과 같이 부하함수에 의해 모의된다.

$$YP = 0.001 \times Y \times CP \times ER \quad (A.38)$$

여기서 YP 는 유사와 함께 유실되는 인의 양 (kg/ha), Y 는 유사량 (t/ha)이며 CP 는 표토층의 인 농도 (g/ton), ER 은 농축비율이다.

A.2. APEX 모형 데이터베이스

A.2.1 기후자료

기후자료는 기상청의 종관기상관측자료 (ASOS: Automated Surface Observing System)를 바탕으로 구축하였다. 모형에 입력자료로 사용되는 일 단위 기상요소는 일사량 (MJ/m^2), 최고·최저기온 ($^{\circ}\text{C}$), 강수량 (mm), 상대습도 (-), 평균풍속 (m/s)의 순서로 작성된다. 대관령, 미시령 등 산악지역의 기상관측자료를 제외하고 기후변화시나리오의 전지구모형 (GCM) 기준년도인 1976년부터 2005년까지 30년의 기상정보를 확보하고 있는 60개 측후소를 대상으로 데이터베이스를 구축하였으며 APEX 모형 및 APEX-Paddy 모형 기초 데이터베이스에 포함시켰다.

KR0090.DLY	KR0138.DLY	KR0201.DLY	KR0260.DLY	1976	1	1	3.7	11.5	4.2	0.0	0.44	3.7
KR0100.DLY	KR0140.DLY	KR0202.DLY	KR0261.DLY	1976	1	2	10.3	10.6	3.9	0.0	0.53	2.5
KR0101.DLY	KR0143.DLY	KR0203.DLY	KR0262.DLY	1976	1	3	8.9	11.7	2.8	0.0	0.56	1.6
KR0105.DLY	KR0146.DLY	KR0211.DLY	KR0272.DLY	1976	1	4	7.7	11.5	2.4	0.0	0.69	3.3
KR0108.DLY	KR0152.DLY	KR0212.DLY	KR0273.DLY	1976	1	5	9.5	4.7	-3.7	0.0	0.46	7.8
KR0112.DLY	KR0156.DLY	KR0221.DLY	KR0277.DLY	1976	1	6	10.6	2.5	-5.2	0.0	0.37	4.9
KR0114.DLY	KR0159.DLY	KR0226.DLY	KR0278.DLY	1976	1	7	7.8	8.4	0.6	0.0	0.55	3.6
KR0115.DLY	KR0162.DLY	KR0232.DLY	KR0279.DLY	1976	1	8	10.3	6.5	-4.8	0.1	0.53	4.6
KR0119.DLY	KR0165.DLY	KR0235.DLY	KR0281.DLY	1976	1	9	10.3	-2.2	-7.6	0.0	0.41	3.8
KR0127.DLY	KR0168.DLY	KR0236.DLY	KR0284.DLY	1976	1	10	10.4	-3.0	-10.3	0.0	0.37	5.5
KR0129.DLY	KR0170.DLY	KR0238.DLY	KR0285.DLY	1976	1	11	10.5	-3.0	-7.7	0.0	0.42	4.3
KR0130.DLY	KR0184.DLY	KR0243.DLY	KR0288.DLY	1976	1	12	11.4	4.5	-7.3	0.0	0.35	3.0
KR0131.DLY	KR0188.DLY	KR0244.DLY	KR0289.DLY	1976	1	13	4.9	5.5	-0.4	0.0	0.52	2.5
KR0133.DLY	KR0189.DLY	KR0245.DLY	KR0294.DLY	1976	1	14	10.9	2.4	-4.9	0.0	0.47	4.0
KR0135.DLY	KR0192.DLY	KR0247.DLY	KR0295.DLY	1976	1	15	10.5	3.1	-6.8	0.0	0.40	1.6
				1976	1	16	8.1	6.0	-4.0	0.0	0.52	2.2
				1976	1	17	10.9	5.0	-4.8	0.0	0.37	5.9
				1976	1	18	11.3	-0.2	-6.8	0.0	0.28	4.6
				1976	1	19	11.5	-4.0	-10.8	0.0	0.28	5.9
				1976	1	20	12.0	-5.1	-12.5	0.0	0.27	5.8
				1976	1	21	11.6	-2.9	-11.9	0.0	0.26	5.8

(a) List of climate data

(b) Components of climate data

Fig. A.6 Climate database of South Korea

A.2.2 토양자료

토양자료로서 국립농업과학원의 흙토람 데이터베이스를 기반으로 총 377개의 토양통에 대하여 자료를 구축하였으며 APEX 모형 및 APEX-Paddy 모형 기초 데이터베이스에 포함시켰다. 모형에 적용되는 주요 토양 특성 정보는 수문학적 토양군, 토양 층위별 깊이 (m), 층위별 용적밀도 (t/m^3), 위조점의 수분함량 (m/m), 포장용수량의 수분함량 (m/m), 모래함량, 실트함량, 유기물 함량, 포화수리전도도 (mm/h) 등이다.

NANGYEONG																													
1.soi	43.soi	85.soi	127.soi	169.soi	211.soi	253.soi	295.soi	337.soi	379.soi	421.soi	463.soi	505.soi	547.soi	589.soi	631.soi	673.soi	715.soi	757.soi	799.soi	841.soi	883.soi	925.soi	967.soi	1009.soi	1051.soi	1093.soi	1135.soi	1177.soi	1219.soi
2.soi	44.soi	86.soi	128.soi	170.soi	212.soi	254.soi	296.soi	338.soi	380.soi	422.soi	464.soi	506.soi	548.soi	590.soi	632.soi	674.soi	716.soi	758.soi	800.soi	842.soi	884.soi	926.soi	968.soi	1010.soi	1052.soi	1094.soi	1136.soi	1178.soi	1220.soi
3.soi	45.soi	87.soi	129.soi	171.soi	213.soi	255.soi	297.soi	339.soi	381.soi	423.soi	465.soi	507.soi	549.soi	591.soi	633.soi	675.soi	717.soi	759.soi	801.soi	843.soi	885.soi	927.soi	969.soi	1011.soi	1053.soi	1095.soi	1137.soi	1179.soi	1221.soi
4.soi	46.soi	88.soi	130.soi	172.soi	214.soi	256.soi	298.soi	340.soi	382.soi	424.soi	466.soi	508.soi	550.soi	592.soi	634.soi	676.soi	718.soi	760.soi	802.soi	844.soi	886.soi	928.soi	970.soi	1012.soi	1054.soi	1096.soi	1138.soi	1180.soi	1222.soi
5.soi	47.soi	89.soi	131.soi	173.soi	215.soi	257.soi	299.soi	341.soi	383.soi	425.soi	467.soi	509.soi	551.soi	593.soi	635.soi	677.soi	719.soi	761.soi	803.soi	845.soi	887.soi	929.soi	971.soi	1013.soi	1055.soi	1097.soi	1139.soi	1181.soi	1223.soi
6.soi	48.soi	90.soi	132.soi	174.soi	216.soi	258.soi	300.soi	342.soi	384.soi	426.soi	468.soi	510.soi	552.soi	594.soi	636.soi	678.soi	720.soi	762.soi	804.soi	846.soi	888.soi	930.soi	972.soi	1014.soi	1056.soi	1098.soi	1140.soi	1182.soi	1224.soi
7.soi	49.soi	91.soi	133.soi	175.soi	217.soi	259.soi	301.soi	343.soi	385.soi	427.soi	469.soi	511.soi	553.soi	595.soi	637.soi	679.soi	721.soi	763.soi	805.soi	847.soi	889.soi	931.soi	973.soi	1015.soi	1057.soi	1099.soi	1141.soi	1183.soi	1225.soi
8.soi	50.soi	92.soi	134.soi	176.soi	218.soi	260.soi	302.soi	344.soi	386.soi	428.soi	470.soi	512.soi	554.soi	596.soi	638.soi	680.soi	722.soi	764.soi	806.soi	848.soi	890.soi	932.soi	974.soi	1016.soi	1058.soi	1100.soi	1142.soi	1184.soi	1226.soi
9.soi	51.soi	93.soi	135.soi	177.soi	219.soi	261.soi	303.soi	345.soi	387.soi	429.soi	471.soi	513.soi	555.soi	597.soi	639.soi	681.soi	723.soi	765.soi	807.soi	849.soi	891.soi	933.soi	975.soi	1017.soi	1059.soi	1101.soi	1143.soi	1185.soi	1227.soi
10.soi	52.soi	94.soi	136.soi	178.soi	220.soi	262.soi	304.soi	346.soi	388.soi	430.soi	472.soi	514.soi	556.soi	598.soi	640.soi	682.soi	724.soi	766.soi	808.soi	850.soi	892.soi	934.soi	976.soi	1018.soi	1060.soi	1102.soi	1144.soi	1186.soi	1228.soi
11.soi	53.soi	95.soi	137.soi	179.soi	221.soi	263.soi	305.soi	347.soi	389.soi	431.soi	473.soi	515.soi	557.soi	599.soi	641.soi	683.soi	725.soi	767.soi	809.soi	851.soi	893.soi	935.soi	977.soi	1019.soi	1061.soi	1103.soi	1145.soi	1187.soi	1229.soi
12.soi	54.soi	96.soi	138.soi	180.soi	222.soi	264.soi	306.soi	348.soi	390.soi	432.soi	474.soi	516.soi	558.soi	600.soi	642.soi	684.soi	726.soi	768.soi	810.soi	852.soi	894.soi	936.soi	978.soi	1020.soi	1062.soi	1104.soi	1146.soi	1188.soi	1230.soi
13.soi	55.soi	97.soi	139.soi	181.soi	223.soi	265.soi	307.soi	349.soi	391.soi	433.soi	475.soi	517.soi	559.soi	601.soi	643.soi	685.soi	727.soi	769.soi	811.soi	853.soi	895.soi	937.soi	979.soi	1021.soi	1063.soi	1105.soi	1147.soi	1189.soi	1231.soi
14.soi	56.soi	98.soi	140.soi	182.soi	224.soi	266.soi	308.soi	350.soi	392.soi	434.soi	476.soi	518.soi	560.soi	602.soi	644.soi	686.soi	728.soi	770.soi	812.soi	854.soi	896.soi	938.soi	980.soi	1022.soi	1064.soi	1106.soi	1148.soi	1190.soi	1232.soi
15.soi	57.soi	99.soi	141.soi	183.soi	225.soi	267.soi	309.soi	351.soi	393.soi	435.soi	477.soi	519.soi	561.soi	603.soi	645.soi	687.soi	729.soi	771.soi	813.soi	855.soi	897.soi	939.soi	981.soi	1023.soi	1065.soi	1107.soi	1149.soi	1191.soi	1233.soi
16.soi	58.soi	100.soi	142.soi	184.soi	226.soi	268.soi	310.soi	352.soi	394.soi	436.soi	478.soi	520.soi	562.soi	604.soi	646.soi	688.soi	730.soi	772.soi	814.soi	856.soi	898.soi	940.soi	982.soi	1024.soi	1066.soi	1108.soi	1150.soi	1192.soi	1234.soi
17.soi	59.soi	101.soi	143.soi	185.soi	227.soi	269.soi	311.soi	353.soi	395.soi	437.soi	479.soi	521.soi	563.soi	605.soi	647.soi	689.soi	731.soi	773.soi	815.soi	857.soi	899.soi	941.soi	983.soi	1025.soi	1067.soi	1109.soi	1151.soi	1193.soi	1235.soi
18.soi	60.soi	102.soi	144.soi	186.soi	228.soi	270.soi	312.soi	354.soi	396.soi	438.soi	480.soi	522.soi	564.soi	606.soi	648.soi	690.soi	732.soi	774.soi	816.soi	858.soi	900.soi	942.soi	984.soi	1026.soi	1068.soi	1110.soi	1152.soi	1194.soi	1236.soi
19.soi	61.soi	103.soi	145.soi	187.soi	229.soi	271.soi	313.soi	355.soi	397.soi	439.soi	481.soi	523.soi	565.soi	607.soi	649.soi	691.soi	733.soi	775.soi	817.soi	859.soi	901.soi	943.soi	985.soi	1027.soi	1069.soi	1111.soi	1153.soi	1195.soi	1237.soi
20.soi	62.soi	104.soi	146.soi	188.soi	230.soi	272.soi	314.soi	356.soi	398.soi	440.soi	482.soi	524.soi	566.soi	608.soi	650.soi	692.soi	734.soi	776.soi	818.soi	860.soi	902.soi	944.soi	986.soi	1028.soi	1070.soi	1112.soi	1154.soi	1196.soi	1238.soi
21.soi	63.soi	105.soi	147.soi	189.soi	231.soi	273.soi	315.soi	357.soi	399.soi	441.soi	483.soi	525.soi	567.soi	609.soi	651.soi	693.soi	735.soi	777.soi	819.soi	861.soi	903.soi	945.soi	987.soi	1029.soi	1071.soi	1113.soi	1155.soi	1197.soi	1239.soi
22.soi	64.soi	106.soi	148.soi	190.soi	232.soi	274.soi	316.soi	358.soi	400.soi	442.soi	484.soi	526.soi	568.soi	610.soi	652.soi	694.soi	736.soi	778.soi	820.soi	862.soi	904.soi	946.soi	988.soi	1030.soi	1072.soi	1114.soi	1156.soi	1198.soi	1240.soi
23.soi	65.soi	107.soi	149.soi	191.soi	233.soi	275.soi	317.soi	359.soi	401.soi	443.soi	485.soi	527.soi	569.soi	611.soi	653.soi	695.soi	737.soi	779.soi	821.soi	863.soi	905.soi	947.soi	989.soi	1031.soi	1073.soi	1115.soi	1157.soi	1199.soi	1241.soi
24.soi	66.soi	108.soi	150.soi	192.soi	234.soi	276.soi	318.soi	360.soi	402.soi	444.soi	486.soi	528.soi	570.soi	612.soi	654.soi	696.soi	738.soi	780.soi	822.soi	864.soi	906.soi	948.soi	990.soi	1032.soi	1074.soi	1116.soi	1158.soi	1200.soi	1242.soi
25.soi	67.soi	109.soi	151.soi	193.soi	235.soi	277.soi	319.soi	361.soi	403.soi	445.soi	487.soi	529.soi	571.soi	613.soi	655.soi	697.soi	739.soi	781.soi	823.soi	865.soi	907.soi	949.soi	991.soi	1033.soi	1075.soi	1117.soi	1159.soi	1201.soi	1243.soi
26.soi	68.soi	110.soi	152.soi	194.soi	236.soi	278.soi	320.soi	362.soi	404.soi	446.soi	488.soi	530.soi	572.soi	614.soi	656.soi	698.soi	740.soi	782.soi	824.soi	866.soi	908.soi	950.soi	992.soi	1034.soi	1076.soi	1118.soi	1160.soi	1202.soi	1244.soi
27.soi	69.soi	111.soi	153.soi	195.soi	237.soi	279.soi	321.soi	363.soi	405.soi	447.soi	489.soi	531.soi	573.soi	615.soi	657.soi	699.soi	741.soi	783.soi	825.soi	867.soi	909.soi	951.soi	993.soi	1035.soi	1077.soi	1119.soi	1161.soi	1203.soi	1245.soi
28.soi	70.soi	112.soi	154.soi	196.soi	238.soi	280.soi	322.soi	364.soi	406.soi	448.soi	490.soi	532.soi	574.soi	616.soi	658.soi	700.soi	742.soi	784.soi	826.soi	868.soi	910.soi	952.soi	994.soi	1036.soi	1078.soi	1120.soi	1162.soi	1204.soi	1246.soi
29.soi	71.soi	113.soi	155.soi	197.soi	239.soi	281.soi	323.soi	365.soi	407.soi	449.soi	491.soi	533.soi	575.soi	617.soi	659.soi	701.soi	743.soi	785.soi	827.soi	869.soi	911.soi	953.soi	995.soi	1037.soi	1079.soi	1121.soi	1163.soi	1205.soi	1247.soi
30.soi	72.soi	114.soi	156.soi	198.soi	240.soi	282.soi	324.soi	366.soi	408.soi	450.soi	492.soi	534.soi	576.soi	618.soi	660.soi	702.soi	744.soi	786.soi	828.soi	870.soi	912.soi	954.soi	996.soi	1038.soi	1080.soi	1122.soi	1164.soi	1206.soi	1248.soi
31.soi	73.soi	115.soi	157.soi	199.soi	241.soi	283.soi	325.soi	367.soi	409.soi	451.soi	493.soi	535.soi	577.soi	619.soi	661.soi	703.soi	745.soi	787.soi	829.soi	871.soi	913.soi	955.soi	997.soi	1039.soi	1081.soi	1123.soi	1165.soi	1207.soi	1249.soi
32.soi	74.soi	116.soi	158.soi	200.soi	242.soi	284.soi	326.soi	368.soi	410.soi	452.soi	494.soi	536.soi	578.soi	620.soi	662.soi	704.soi	746.soi	788.soi	830.soi	872.soi	914.soi	956.soi	998.soi	1040.soi	1082.soi	1124.soi	1166.soi	1208.soi	1250.soi
33.soi	75.soi	117.soi	159.soi	201.soi	243.soi	285.soi	327.soi	369.soi	411.soi	453.soi	495.soi	537.soi	579.soi	621.soi	663.soi	705.soi	747.soi	789.soi	831.soi	873.soi	915.soi	957.soi	999.soi	1041.soi	1083.soi	1125.soi	1167.soi	1209.soi	1251.soi
34.soi	76.soi	118.soi	160.soi	202.soi	244.soi	286.soi	328.soi	370.soi	412.soi	454.soi	496.soi	538.soi	580.soi	622.soi	664.soi	706.soi	748.soi	790.soi	832.soi	874.soi	916.soi	958.soi	1000.soi	1042.soi	1084.soi	1126.soi	1168.soi	1210.soi	1252.soi
35.soi	77.soi	119.soi	161.soi	203.soi	245.soi	287.soi	329.soi	371.soi	413.soi	455.soi	497.soi	539.soi	581.soi	623.soi	665.soi	707.soi	749.soi	791.soi	833.soi	875.soi	917.soi	959.soi	1001.soi	1043.soi	1085.soi	1127.soi	1169.soi	1211.soi	1253.soi
36.soi	78.soi	120.soi	162.soi	204.soi	246.soi	288.soi	330.soi	372.soi	414.soi	456.soi	498.soi	540.soi	582.soi	624.soi	666.soi	708.soi	750.soi	792.soi	834.soi	876.soi	918.soi	960.soi	1002.soi	1044.soi	1086.soi	1128.soi	1170.soi	1212.soi	1254.soi
37.soi	79.soi	121.soi	163.soi	205.soi	247.soi	289.soi	331.soi	373.soi	415.soi	457.soi	499.soi	541.soi	583.soi	625.soi	667.soi	709.soi	751.soi	793.soi	835.soi	877.soi	919.soi	961.soi	1003.soi	1045.soi	1087.soi	1129.soi	1171.soi	1213.soi	1255.soi
38.soi	80.soi	122.soi	164.soi	206.soi	248.soi	290.soi	332.soi	374.soi	416.soi	458.soi	500.soi	542.soi	584.soi	626.soi	668.soi	710.soi	752.soi	794.soi	836.soi	878.soi	920.soi	962.soi	1004.soi	1046.soi	1088.soi	1130.soi	1172.soi	1214.soi	1256.soi
39.soi	81.soi	123.soi	165.soi	207.soi	249.soi	291.soi	333.soi	375.soi	417.soi	459.soi	501.soi	543.soi	585.soi	627.soi	669.soi	711.soi	753.soi	795.soi	837.soi	879.soi	921.soi	963.soi	1005.soi	1047.soi	1089.soi	1131.soi	1173.soi	1215.soi	1257.soi
40.soi	82.soi	124.soi	166.soi																										

A.2.3 재배관리자료

논의 재배관리는 지역 별, 경작자 별로 매우 다르나 지역의 일반적인 농작업에 관한 입력자료는 해당 시군의 농업기술센터의 자문과 국립식량과학원의 작황시험보고서 (국립식량과학원, 2009)를 기반으로 중만생종 벼에 대하여 작성하였다. 예를 들어 이천시의 논벼 재배관리는 Table A.1과 같이 정리 할 수 있다.

Table A.1 Typical paddy management schedule (ex. Icheon)

Date	Operation	Amounts
May 1	Pesticide application	30 kg/ha
May 1	Ploughing	30 cm depth
May 1	Irrigation	100 mm ponding
May 10	Fertilizer application	64 kgN/ha, 42 kgP/ha
May 10	Puddling	30 cm depth
May 15	lower water depth	25 mm ponding
May 15	Transplanting	125 stalks/ha
May 20	Irrigation	60 mm ponding
May 30	Pesticide application	30 kg/ha
Jun. 5	Fertilizer application	16 kgN/ha
Jul. 20	Stop irrigation and drain water	
Aug. 1	Irrigation	80 mm ponding
Jul. 25	Fertilizer application	12.1 kgN/ha
Sep. 25	Stop irrigation and drain water	
Oct. 10	Harvest	

이천의 경우 5월 5일 경 경운을 하고 담수 후 5월 10일 경 시비 (기비)와 함께 씨레질을 한다. 어느 정도 흙탕물이 가라앉으면 논 수위를 낮추고 5월 20일 경 이앙을 하며 이앙 이후 60 mm 수준으로 담수를 한다. 담수 후 잡초 방제를 위해 농약을 살포하고 6월 10일 경 분얼을 활성화하기 위해 1차 추비 (분얼비)를 한다. 뿌리활착 및 유효분얼 활성화를 위하여 7월 20일 경 약 10일 간 중간낙수(논 물 뺌)를 하고 7월 25일 경 2차 추비 (이삭비)를 한다. 8월 1일 경 다시 논에 물을 대며 이때는 80 mm깊이로 담수한다. 9월 20일 경 관개를 종료하고 물을 빼 땅을 말리고 10월 10일 경 수확한다.

이앙 시 개체밀도는 작물의 최대 엽면적지수와 관련된 인자로서 생산량에 추정에 있어 중요하다. APEX 모형은 분얼을 모의하지 못하기 때문에 초기 작물 개체밀도를 정할 때 유효분얼을 고려하여 최종 수확기의 개체밀도를 입력하여야 한다. 작황시험보고서 (국립식량과학원, 2009)에 따르면 적과 적식의 경우 이앙간격은 $14\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ ($23.81\text{ 주}/\text{m}^3$)를 기준으로 한다. 이앙 시 한 주(개체군) 당 3~4 개체를 심으며 적과 적식의 경우 출수기 유효 분얼 수는 평균 $18.4\text{ 개체}/\text{m}^2$ 이다 (국립식량과학원, 2009). 한 주 당 3.5개의 모를 심는다고 가정할 경우 분얼에 따라 개체 수가 약 5.26배 ($18.4 \div 3.5$) 증가한다고 가정할 수 있다. 이에 따라 모형 입력 값으로 사용되는 단위 면적 당 개체군 수는 $125\text{ 개체군}/\text{m}^3$ ($\approx 23.8 \times 5.26$)이다 (Choi *et al.*, 2017). 개체군이 아닌 개체수 (경수)로 개체밀도 입력값을 구성할 경우 Table 3.1의 PPLP1, PPLP2 값을 수정하여야 한다.

Abstract

APEX-Paddy Model Development and Climate Change Impact Assessment for Paddy Rice

Choi, Soon Kun

Major in Rural Systems Engineering

Department of Landscape Architecture and

Rural Systems Engineering

The Graduate School of Seoul National University

Rice paddy accounts for about 58% of farmlands in South Korea, and it is closely related to the water environment. Climate change is expected to affect agricultural productivity, water circulation and the environment as a whole. Therefore, in order to evaluate long-term agricultural water resource plan and the changes in agricultural environment, it is necessary to develop a model considering the environment of rice paddy cultivation and study the impact assessment of climate change.

In this study, APEX-Paddy (Agricultural Policy/Environmental eXtender-Paddy) model was developed to reflect rice paddy environment by modifying APEX model which can analyze the effects of BMPs (Best Management Practices) technology to

reduce non-point source pollution. In order to calibrate and validate the model, the inflow, outflow, and mineral nitrogen load data measured in Icheon test bed and the inflow, outflow, and evapotranspiration data measured in Gimje test bed were used. By calculating evapotranspiration, taking into account the water layer evaporation and considering rice cultivation characteristics like paddy water management, the accuracy of simulation was improved.

Bias corrected climate change scenarios are applied to the APEX-Paddy model for the impact assessment of climate change for paddy rice. Using the AIMS (APCC Integrated Modeling Solution) offered by the APEC Climate Center, bias correction was conducted for 9 GCMs (General Circulation model) using non-parametric quantile mapping. The changes in rice yield, irrigation water requirement, and mineral nitrogen load were evaluated using multi-model ensemble. Paddy irrigation water requirement showed a change of -1.3 to 2.7% comparing the 2085s (2071 to 2100) against the base period (1976 to 2005), which was not significant. The rice yield was found to have decreased from 19.4% to 31.2%, and the mineral nitrogen load was found to have increased from 16.9% to 76.0%.

In this study, it is meaningful to analyze the impact of climate change for paddy rice by developing a process-based model considering paddy cultivation environment, and by using multi-model ensemble. The results of this study can be used as

a basis for the formulation of mid- and long-term policies for paddy rice production, water resources, and water environment considering climate change.

keywords : Paddy, rice, APEX-Paddy model, climate change,
multi-model ensemble

Student Number : 2015-30470